
BRIAN
GREENE
HASTA
EL FINAL
DEL TIEMPO
Mente, materia y nuestra
búsqueda de significado en un universo
en evolución
Lectulandia

Hasta el final del tiempo es la nueva e impresionante exploración que Brian Greene hace del cosmos y nuestra búsqueda para llegar a comprenderlo. Partiendo de que los humanos somos las únicas criaturas con conciencia de nuestra finitud, y de que también el universo morirá algún día, el autor traza un viaje que nos lleva desde nuestro conocimiento más exacto sobre cómo empezó el universo hasta el final del tiempo, explorando cómo se formaron las estructuras duraderas, cómo del caos inicial surgió la vida y cómo nuestras mentes, al llegar a comprender su propia temporalidad, han buscado diferentes maneras dar sentido a la experiencia a través de la historia, el mito, la religión, la expresión creativa o la ciencia.

A través de una serie de historias entretejidas que explican distintas capas de realidad, Greene nos proporciona una idea más clara de cómo llegamos a ser, una imagen más precisa de dónde estamos ahora y una comprensión más firme de hacia dónde nos dirigimos. Desde las partículas hasta los planetas, desde la conciencia hasta la creatividad, desde la materia hasta el significado, Brian Greene nos permite comprender y apreciar nuestro fugaz pero absolutamente exquisito momento en el cosmos.

Brian Greene

Hasta el final del tiempo

Mente, materia y nuestra búsqueda de significado en un universo en evolución

ePub r1.0
Titivillus 06-05-2021

Título original: *Until the End of Time. Mind, Matter, and Our Search for Meaning in an Evolving Universe*
Brian Greene, 2020
Traducción: Joan Lluís Riera Rey

Editor digital: Titivillus
ePub base r2.1


Para Tracy

Prefacio

«Me dedico a las matemáticas porque un teorema, una vez demostrado, es para siempre»[1]. Esta declaración, simple y directa, me sorprendió. Me encontraba entonces en mi segundo año de universidad. Le había comentado a un antiguo amigo, que durante años me había introducido a las grandes áreas de las matemáticas, que estaba escribiendo un ensayo sobre la motivación humana para un curso de psicología al que me había apuntado. Su respuesta me cambió. Nunca antes había pensado en las matemáticas de aquella manera. Ni de lejos. Para mí, estas eran un maravilloso juego de precisión abstracta al cual se entregaba una peculiar comunidad de individuos que reían las ocurrencias en torno a las raíces cuadradas o la división por cero. Pero aquel comentario logró que de repente lo comprendiera. «En efecto —pensé—. Ese es el romanticismo de las matemáticas». Una creatividad sujeta a las riendas de la lógica y un conjunto de axiomas que dictan de qué manera se pueden manipular y combinar las ideas para revelar verdades inmutables. Todo triángulo rectángulo dibujado desde antes de Pitágoras y hasta la eternidad satisface el famoso teorema que lleva su nombre. Sin excepción. Podemos cambiar los supuestos y explorar espacios nuevos que violan las conclusiones de Pitágoras, por ejemplo, triángulos en superficies curvas como la piel de un balón. Pero si revisamos los supuestos y comprobamos a fondo nuestro trabajo, el resultado puede grabarse en piedra. No hace falta escalar una montaña, atravesar un desierto o triunfar sobre el inframundo. Para crear algo intemporal basta con sentarse cómodamente en el escritorio y usar papel, lápiz y una mente aguda.

Aquella perspectiva me abrió todo un mundo. Nunca me había preguntado *por qué* sentía una atracción tan profunda por la física y las matemáticas. Resolver problemas, aprender cómo está hecho el universo, eso es lo que siempre me había cautivado. Ahora estaba convencido de que me sentía atraído hacia esas disciplinas porque se alzan sobre la naturaleza transitoria de lo cotidiano. Por mucho que mi juvenil sensibilidad exagerase aquel

compromiso, de pronto estaba convencido de querer participar en ese viaje hacia descubrimientos tan fundamentales que nunca pudieran cambiarse. Ya podían ascender y caer los gobiernos, ganarse o perderse las ligas de deporte, brillar y apagarse las leyendas del cine, la televisión o el teatro. Yo quería dedicar mi vida a intentar vislumbrar algo trascendente.

Entretanto, todavía tenía que escribir aquel ensayo de psicología. Me habían encomendado la tarea de desarrollar una teoría de por qué los humanos hacemos lo que hacemos, pero cada vez que comenzaba a redactar, el proyecto se tornaba decididamente nebuloso. Me parecía que si lograba vestir unas ideas más o menos razonables con el lenguaje apropiado, podría ir desarrollado la teoría sobre la marcha. Mencioné mis tribulaciones durante la cena en la residencia de estudiantes y uno de los tutores me sugirió que le echase un vistazo a *La decadencia de Occidente*, de Oswald Spengler, un historiador y filósofo alemán que sentía un gran interés por la matemática y la ciencia, lo que sin duda fue la razón de que me recomendasen su libro.

Ciertas cuestiones responsables de la fama y escarnio del libro (predicciones de implosión política y una velada defensa del fascismo) son profundamente preocupantes y se han utilizado para apoyar ideologías insidiosas, pero yo estaba demasiado centrado en lo que buscaba como para darme cuenta. Lo que me intrigaba era la visión de Spengler sobre un conjunto global de principios que habrían de servirnos para revelar patrones ocultos que se manifestaban en culturas dispares, al estilo de los patrones desvelados por el cálculo y la geometría euclidiana, que habían transformado nuestra comprensión de la física y las matemáticas[2]. Spengler hablaba mi idioma. Resultaba inspirador que en una obra de historia se admirasen las matemáticas y la física como patrón de progreso. Pero entonces me encontré con una observación que me tomó completamente por sorpresa: «El hombre es el único ser que conoce la muerte; todos los demás envejecen, pero con una conciencia restringida al momento presente, que les debe parecer eterno», y este conocimiento instila el «temor esencialmente humano ante la muerte». Spengler llegaba a la conclusión de que «toda religión, toda indagación científica, toda filosofía procede de él»[3].

Recuerdo haberme detenido en esta última línea. Aquella perspectiva sobre la motivación humana tenía sentido para mí. Quizá el encanto de una demostración matemática sea su permanencia. Quizá el atractivo de una ley de la naturaleza sea su cualidad de intemporal. Pero ¿qué nos empuja a buscar lo intemporal, las cualidades que pueden permanecer para siempre? Quizá todo se derive de nuestra singular conciencia de que somos de todo menos

intemporales, de que nuestras vidas no son eternas. Aquello se hacía eco de mi recién hallada manera de pensar en las matemáticas, la física y la seducción de la eternidad; me parecía que iba bien encaminado. Era un enfoque sobre la motivación humana bien anclado en una respuesta plausible a un reconocimiento generalizado, un enfoque que no se construía sobre la marcha.

Al reflexionar sobre esta conclusión, me pareció que prometía algo de más calado. La ciencia, como Spengler observaba, es una respuesta al conocimiento de nuestro ineludible final. También lo es la religión. Pero ¿por qué pararse ahí? Para Otto Rank, uno de los primeros discípulos de Freud que se interesó vivamente por el proceso creativo humano, de ningún modo hay que pararse ahí. El artista, en la valoración de Rank, es aquel cuyo «impulso creativo… intenta transformar la vida efímera en inmortalidad personal»[4]. Jean-Paul Sartre fue aún más lejos al observar que la propia vida queda vacía de significado «cuando se pierde la ilusión de ser eterno»[5]. La sugerencia que se abre camino entre estos pensadores y otros que les siguieron es que la vida impulsa buena parte de la cultura humana, desde la exploración artística hasta el descubrimiento científico, al hacernos reflexionar sobre su propia naturaleza finita.

Aquello sí eran aguas profundas. ¿Quién hubiera imaginado que un interés por todo lo físico y lo matemático pudiera enlazar con visiones de una teoría unificada sobre la civilización humana movida por la rica dualidad de la vida y la muerte?

De acuerdo. Voy a respirar hondo y recordarle a mi viejo yo de segundo de carrera que no conviene dejarse llevar. Pero lo cierto es que la emoción que sentí entonces resultó ser algo más que un transitorio sobrecogimiento intelectual. Durante las cuatro décadas que han transcurrido desde entonces, esos temas me han acompañado siempre, a menudo bullendo a fuego lento en la trastienda de mi mente. Aunque en mi profesión me haya dedicado a buscar teorías unificadas y orígenes cósmicos, al reflexionar sobre el significado más profundo de los avances científicos me he sorprendido volviendo una y otra vez a las preguntas sobre el tiempo, sobre el poco que se nos concede. Ahora bien, por temperamento y por formación soy escéptico con las explicaciones demasiado generales; el vertedero de la física está a rebosar de fracasadas teorías unificadas de las fuerzas de la naturaleza. Tendríamos que mostrar mayor cautela al aventurarnos por el complejo territorio del comportamiento humano. Y la verdad es que he llegado a concebir la conciencia de mi propio e inevitable final como algo de considerable influencia, pero que no ofrece

una explicación última de todo lo que hago, e imagino que, en mayor o menor medida, esta es una valoración habitual. Pero a pesar de todo, existe un dominio en el que los tentáculos de la mortalidad se manifiestan de manera especial.

A lo largo de los siglos y a través de las culturas, hemos asignado un valor considerable a la permanencia. Y lo hemos hecho de formas muy diversas: unos buscan verdades absolutas, otros se esfuerzan por dejar un legado perdurable, algunos construyen monumentos formidables, otros persiguen leyes mutables, y aún otros se entregan con fervor a una u otra versión de lo perdurable. La eternidad, como bien demuestran estas preocupaciones, ejerce una poderosa influencia sobre la mente, consciente de que su duración material es limitada.

En nuestra era, los científicos, equipados con las herramientas de la experimentación, la observación y el análisis matemático, han desbrozado un nuevo camino hacia el futuro; un camino que, por primera vez, ha revelado las principales prominencias del paisaje que, todavía lejano, nos aguarda. Aunque oscurecido aquí y allá por brumas y neblinas, el panorama comienza a ser lo bastante claro para que nosotros, mentes pensantes, podamos vislumbrar mejor que nunca cómo encajamos en la vasta extensión del tiempo.

Con este espíritu, en las páginas que siguen, caminaremos hacia atrás por el hilo del tiempo de nuestro universo y exploraremos los principios físicos que dan origen a estructuras dotadas de orden, de las estrellas y galaxias a la conciencia, dentro de un universo abocado a la decadencia. Tomaremos en consideración argumentos que establecen que, igual que los seres humanos, también los propios fenómenos de la vida y la mente gozan de un tiempo limitado en el universo. De hecho, cabe la probabilidad de que en algún momento la materia organizada, del tipo que sea, deje de ser posible. Examinaremos de qué modo unos seres que reflexionan sobre sí mismos confrontan la tensión que conlleva comprender esto. Somos el producto de leyes que, por lo que sabemos, son eternas, y, sin embargo, existimos durante un brevísimo instante. Nos rigen leyes que operan de espaldas a cualquier destino, y, sin embargo, no dejamos de preguntarnos a nosotros mismos adónde nos dirigimos. Estamos moldeados por leyes que no parecen responder a razón alguna, y, sin embargo, no cejamos en la búsqueda de propósito y significado.

En pocas palabras, emprenderemos un viaje por el universo desde el principio de los tiempos hasta algo semejante a un final, y por el camino

exploraremos las asombrosas maneras mediante las cuales las mentes inquietas e inventivas han iluminado y respondido a la transitoriedad fundamental de todo.

En esta exploración nos dejaremos guiar por las perspectivas que nos ofrecen distintas disciplinas científicas. Con la ayuda de analogías y metáforas, explicaré todas las ideas necesarias sin recurrir nunca a un lenguaje técnico, dando por supuesto solamente una formación básica. Para los conceptos más difíciles de comprender, ofrezco breves resúmenes que permitirán al lector seguir avanzando sin perder el hilo. En las notas explico algunas cuestiones algo más a fondo, presento algunos detalles matemáticos y proporciono referencias bibliográficas y sugerencias de lecturas.

Como el tema es vasto y las páginas limitadas, he decidido ceñirme al camino, pero con pausas en algunas encrucijadas que considero esenciales para reconocer nuestro lugar en el contexto más amplio de la historia cosmológica. Es un viaje impulsado por la ciencia, pero al cual da significado la humanidad, y es fuente de una vigorosa y enriquecedora aventura.

1

LA SEDUCCIÓN DE LA ETERNIDAD

Principios, finales y más allá

En la plenitud de los tiempos, todo lo que vive muere. Durante más de tres mil millones de años, mientras especies simples y complejas han hallado acomodo en la jerarquía de la Tierra, la guadaña de la muerte ha proyectado siempre una persistente sombra sobre el florecer de la vida. La diversidad creció cuando la vida se arrastró fuera de los océanos y comenzó a reptar por el suelo y a alzar el vuelo por el cielo. Pero, con el tiempo, el registro de las muertes y los nacimientos, con entradas tan numerosas como estrellas hay en la galaxia, ha ido cuadrando con desapasionada precisión. Nadie puede predecir cómo se desarrollará una vida, pero su destino último es una conclusión inevitable.

De este aciago final, tan ineludible como la puesta del sol, parece que solo nos percatamos los humanos. No cabe duda de que mucho antes de nuestra llegada, los estallidos atronadores de las nubes de tormenta, la furia de los volcanes o las violentas sacudidas de los terremotos hacían salir corriendo a todo lo que pudiera escapar. Pero esas huidas no son más que una reacción instintiva a un peligro inminente. La mayoría de los seres vivos viven el momento, y su miedo nace de una percepción inmediata. Solo los seres humanos reflexionamos sobre el pasado lejano, imaginamos el futuro y somos conscientes de la oscuridad que nos aguarda.

Es aterrador. Aunque no es el miedo lo que nos hace estremecer o correr a buscar cobijo. Se trata más bien de un presentimiento que vive silenciosamente con nosotros, que aprendemos a acallar, a aceptar, a quitarle hierro. Por debajo de las capas que lo ocultan está siempre presente el hecho inquietante de lo que nos espera, un conocimiento que William James

describió como «el gusano en el corazón de nuestras usuales fuentes de gozo»[1]. Trabajar y jugar, anhelar y luchar, desear y amar, todo lo que nos enlaza cada vez con mayor fuerza al tapiz de las vidas que compartimos, solo para que acabe desapareciendo. Parafraseando a Steven Wright, eso asusta a cualquiera hasta medio morirse dos veces[2].

Como es natural, la mayoría de nosotros, por bien de la cordura, no nos obsesionamos con el fin, sino que andamos por el mundo con preocupaciones más terrenales. Aceptamos el final inevitable y dirigimos nuestras energías a otras cosas. Sin embargo, la conciencia de que nuestro final es ineludible nos acompaña siempre, y de un modo u otro participa en las decisiones que tomamos, en los retos que aceptamos, en los caminos que seguimos. Tal como sostenía el antropólogo cultural Ernest Becker, vivimos bajo una constante tensión existencial, empujados hacia el cielo por una conciencia que puede elevarse hasta las alturas de Shakespeare, Beethoven y Einstein, pero anclados a la tierra por una forma física que decaerá hasta reducirse a polvo.

> El hombre está literalmente partido en dos: es consciente de su carácter único y espléndido que lo lleva a encumbrarse en la naturaleza con imponente majestad y, sin embargo, retorna al seno de la tierra para, de manera ciega y estúpida, pudrirse y desaparecer[3].

Para Becker, esa conciencia nos empuja a negarle a la muerte la capacidad de borrarnos. Algunos alivian el ansia existencial con su compromiso con la familia, un equipo, un movimiento, una religión, una nación, con constructos que persistirán más allá del tiempo que le corresponda al individuo en este mundo. Otros dejan tras de sí expresiones creativas, artefactos que extienden la duración de su presencia de manera simbólica. «Volamos hacia la belleza —decía Emerson—, como asilo frente a los terrores de la naturaleza finita»[4]. Otros incluso pretenden vencer la muerte con victorias o conquistas, como si el estatus, el poder o la riqueza les brindaran una inmunidad que para el resto de los mortales queda fuera de su alcance.

Una de las consecuencias de esto a lo largo de todos los tiempos es la fascinación generalizada por cualquier cosa, real o imaginaria, que tenga algo que ver con la eternidad. Desde las profecías de una vida más allá de la muerte a las enseñanzas sobre la reencarnación o las plegarias ante mandalas barridas por el viento, hemos desarrollado estrategias para enfrentarnos al conocimiento de nuestra impermanencia y, a menudo con esperanza, a veces con resignación, hacerle un guiño a la eternidad. Lo que es una novedad de

nuestra época es la notable capacidad de la ciencia para tejer un relato lúcido no solo del pasado hasta el Big Bang, sino también del futuro. Tal vez la propia eternidad quede siempre más allá de nuestras ecuaciones, pero nuestros análisis ya han revelado que el universo que conocemos es transitorio. De los planetas a las estrellas, de los sistemas solares a las galaxias, de los agujeros negros a las nebulosas espirales, nada perdura para siempre. Por lo que sabemos, no solo es finita cada vida individual, también lo es la propia vida. El planeta Tierra, que Carl Sagan describió como «una mota de polvo suspendida en un rayo de sol», es un estallido evanescente en un cosmos exquisito que al final quedará vacío y estéril. Las motas de polvo, cercanas o lejanas, bailan apenas un instante bajo los rayos de sol.

A pesar de ello, aquí en la Tierra hemos salpicado nuestro instante con asombrosas proezas de conocimiento, creatividad e ingenio cada vez que una generación se erguía sobre los logros de quienes los precedieron, intentando clarificar cómo había llegado a ser todo, buscando coherencia en el destino que aguarda a todo y ansiando una respuesta sobre el significado de todo ello.

Ese es el relato que cuenta este libro.

Relatos sobre casi todo

A nuestra especie le encantan las historias. Observamos la realidad, notamos pautas y las unimos en relatos que pueden cautivar, informar, sorprender, entretener y emocionar. El plural —relatos—, es absolutamente esencial. En la biblioteca del pensamiento humano no hay un solo volumen unificado que transmita nuestro conocimiento último. Al contrario, hemos escrito muchas historias, encajadas las unas en las otras, para sondear distintos dominios de la experiencia y la indagación; relatos que, a la postre, analizan los patrones de la realidad con la ayuda de distintas gramáticas y vocabularios. Los protones, neutrones, electrones y otras partículas de la naturaleza son esenciales para el relato reduccionista, para analizar la constitución de la realidad, de los planetas a Picasso, en función de sus componentes microfísicos. El metabolismo, la replicación, la mutación y la adaptación son esenciales para explicar la historia del origen y desarrollo de la vida mediante el análisis del funcionamiento bioquímico de algunas moléculas notables y de las células que gobiernan. Las neuronas, la información, el pensamiento y la conciencia

son esenciales para la historia de la mente, y, con ellos, los relatos proliferan: del mito a la religión, de la literatura a la filosofía, del arte a la música, los relatos nos hablan de la lucha de la humanidad por sobrevivir, de su voluntad por comprender, de su anhelo por expresarse y de su búsqueda de significado.

Todos estos relatos son historias inacabadas que siguen desarrollando pensadores de una gran variedad de disciplinas. Es comprensible. Una saga que se extiende de los quarks a la conciencia es una crónica mayúscula. Con todo, las historias se entrelazan. *Don Quijote* nos habla del deseo de la humanidad por lo heroico a través del frágil Alonso Quijano, un personaje creado por la imaginación de Miguel de Cervantes, un conjunto de huesos, tejidos y células que vivió, respiró, pensó, percibió y sintió, y que, durante su vida, sustentó procesos orgánicos de transformación de energía y excreción de productos de desecho que, a su vez, dependen de movimientos atómicos y moleculares perfeccionados durante miles de millones de años de evolución en un planeta forjado con detritos de explosiones de supernovas dispersos por una sección del espacio que surgió del Big Bang. Y, sin embargo, leer las penurias de don Quijote nos permite una comprensión de la naturaleza humana que se mantendría opaca en una descripción de los movimientos de los átomos y moléculas del caballero errante o en una exposición de los procesos neuronales de la mente de Cervantes mientras escribía la novela. Conectados como sin duda están, los distintos relatos, contados con distintos lenguajes y centrados en distintos niveles de la realidad, proporcionan entendimientos muy diferentes.

Quizá algún día seamos capaces de transitar libremente entre estos relatos, de conectar todos los productos de la mente humana, de la realidad y la ficción, de la ciencia y la imaginación. Quizá algún día recurramos a una teoría unificada de los ingredientes particulares para explicar la sobrecogedora visión de un Rodin o la multitud de respuestas que suscita la visión de *Los burgueses de Calais*. Tal vez logremos comprender por completo de qué modo algo aparentemente mundano, un destello de la luz que se refleja en un plato que gira, puede agitar la mente de un Richard Feynman y compelerlo a reescribir las leyes fundamentales de la física. Más ambicioso aún es imaginar que algún día lleguemos a comprender el funcionamiento de la mente y la materia de una forma tan completa que todo quede revelado, desde los agujeros negros hasta Beethoven, desde la extrañeza cuántica hasta Walt Whitman. Aunque no poseemos una capacidad ni remotamente cercana, es mucho lo que podemos ganar sumergiéndonos en esos relatos científicos, creativos o imaginativos, apreciando cuándo y cómo surgieron de quienes los

precedieron y cómo se manifestaron en la línea del tiempo cósmica, y reconstruyendo los procesos, controvertidos o concluyentes, que los alzaron hasta la posición destacada que hoy ocupan por su valor explicativo[5].

En toda la colección de relatos hallaremos de manera muy clara dos fuerzas que comparten el papel de protagonista. En el capítulo 2 nos encontraremos con la primera: la «entropía». Aunque familiar para muchos por su asociación con el desorden y la tan citada aserción de que este siempre aumenta, la entropía posee algunas cualidades sutiles que permiten que los sistemas físicos se desplieguen de muy diversas maneras, en ocasiones incluso nadando contra la corriente de la entropía (aunque solo en apariencia). Hallaremos ejemplos importantes de esto en el capítulo 3, cuando veamos de qué manera, tras el Big Bang, las partículas, en apariencia desobedeciendo el impulso hacia el desorden, evolucionaron hacia estructuras organizadas como las estrellas, las galaxias y los planetas, y, en último término, hacia configuraciones de la materia animadas por la corriente de la vida. Preguntarnos cómo se puso en marcha esa corriente nos lleva a la segunda de nuestras influencias generales: la «evolución».

La evolución por medio de la selección natural es, como se sabe, el principal motor de la transformación gradual de los sistemas vivos, pero entra en juego mucho antes de que las primeras formas de vida comiencen a competir. En el capítulo 4 conoceremos moléculas en contienda con otras moléculas, peleando por la supervivencia en el cuadrilátero de la materia inanimada. Fueron probablemente estos asaltos sucesivos de darwinismo molecular, pues así se llama este combate químico, lo que produjo una serie de configuraciones cada vez más robustas que, con el tiempo, dieron lugar a las primeras colecciones moleculares que hoy reconoceríamos como vida. Los detalles son aún objeto de estudio de la investigación más puntera, pero tras los magníficos avances de las últimas décadas, el consenso es que vamos por el camino correcto. Todo indica que las fuerzas duales de la entropía y la evolución forman una pareja bien avenida por el escabroso sendero que lleva al origen de la vida. Aunque parezca una extraña pareja (al fin y al cabo, la reputación pública de la entropía es que tira hacia el caos, que parece la antítesis de la evolución o la vida), análisis matemáticos recientes de la entropía sugieren que la vida, o al menos algunas cualidades que asociamos con esta última, podrían ser un producto que «cabe esperar» cuando una fuente de energía de larga duración, como el Sol, deja caer incansablemente sus rayos de luz y calor sobre unos ingredientes moleculares que compiten por los limitados recursos disponibles en un planeta como la Tierra.

Por provisionales que sean algunas de estas ideas, lo que sí es cierto es que unos mil millones de años después de su formación, la Tierra ya estaba repleta de una vida que se desarrollaba bajo la presión evolutiva, y, a partir de aquí, la siguiente fase corresponde ya al darwinismo estándar. Eventos fortuitos, como el impacto de un rayo cósmico o un error molecular durante la replicación del ADN, producen mutaciones al azar. Algunas de esta apenas afectan a la salud o el bienestar del organismo, pero otras lo hacen más o menos apto en la lucha por la supervivencia. Las mutaciones que aumentan la eficacia o aptitud biológica (la *fitness*) cuentan con una probabilidad mayor de transmitirse a la descendencia, pues lo que realmente significa «más apto» en términos biológicos es que el portador del carácter tiene una mayor probabilidad de sobrevivir hasta la madurez reproductora y de tener más descendencia. De este modo, de generación en generación, las cualidades que mejoran la aptitud biológica se van esparciendo.

Miles de millones de años más tarde, mientras este largo proceso se desarrollaba, un conjunto particular de mutaciones proporcionó a algunas formas de vida una mayor capacidad para la cognición. Algunas de estas no solo llegaron a ser conscientes, sino que llegaron a ser conscientes de que eran conscientes. Es decir, algunos seres vivos adquirieron conciencia de sí mismos y, como es natural, se preguntaron qué es la conciencia y cómo surge: ¿cómo puede llegar a pensar y sentir un remolino de materia sin mente? Varios investigadores, como veremos en el capítulo 5, defienden una explicación mecanicista. Sostienen que necesitamos entender el cerebro, es decir, sus componentes, funciones y conexiones, mucho mejor que en la actualidad, pero que una vez hayamos adquirido ese conocimiento, desde ahí pasaremos a una explicación de la conciencia. Otros creen que nos enfrentamos a un reto mucho mayor, y argumentan que la conciencia es el más arduo de los enigmas a los que nos enfrentamos y requerirá de perspectivas radicalmente nuevas no solo respecto a la mente, sino también con relación a la propia naturaleza de la realidad.

Las opiniones convergen a la hora de valorar el impacto de la sofisticación cognitiva sobre nuestro repertorio conductual. A lo largo de decenas de miles de generaciones, durante el Pleistoceno, nuestros ancestros se unieron para formar grupos que subsistían gracias a la caza y la recolección. Con el tiempo, la creciente destreza mental les proporcionó una mayor capacidad para planear, organizar, comunicar, enseñar, evaluar, juzgar y resolver problemas. Aprovechando las mayores capacidades de los individuos, los grupos ejercieron fuerzas comunitarias cada vez más

influyentes. Y eso nos lleva al siguiente conjunto de episodios explicativos, los que nos han hecho como somos. En el capítulo 6 examinamos la adquisición del lenguaje y la consiguiente obsesión por contar historias; en el capítulo 7 nos ocupamos de un particular género de relatos que presagian y sirven de transición hacia las tradiciones religiosas; y en el capítulo 8 exploramos nuestra extensa y persistente búsqueda de la expresión creativa.

En sus pesquisas para hallar la fuente de estos progresos, comunes o sacros, los investigadores han recurrido a una gran variedad de explicaciones. Para nosotros, el faro esencial que seguirá guiándonos será la evolución darwiniana, aplicada ahora al comportamiento humano. Al fin y al cabo, el cerebro no es otra cosa que una estructura biológica más que evoluciona por medio de presiones selectivas, y es el órgano que dispone qué hacemos y cómo respondemos. Durante las últimas décadas, científicos cognitivos y psicólogos evolutivos han ido desarrollando esta perspectiva y han dejado establecido que, igual que buena parte de nuestra biología, también nuestro comportamiento ha respondido a las fuerzas de la evolución darwiniana. Por eso, a lo largo de nuestro viaje por la cultura humana, a menudo nos preguntaremos si tal o cual comportamiento podría haber incrementado la probabilidad de sobrevivir y reproducirse en quienes, tiempo atrás, lo practicaron, lo cual habría favorecido su propagación a través de generaciones de descendientes. Sin embargo, a diferencia del pulgar oponible o la postura erguida (que son rasgos fisiológicos estrechamente vinculados a comportamientos adaptativos concretos), muchas de las características cerebrales heredadas moldean predilecciones más que acciones definidas. Estamos influidos por esas predisposiciones, pero la actividad humana surge de combinar tendencias conductuales con nuestra compleja, deliberativa y autorreflexiva mente.

Por ello, nos guiará también un segundo faro, diferente pero no menos importante, que se enfoca en la vida interior que llega de la mano de nuestras sofisticadas capacidades cognitivas. Siguiendo un camino hollado por muchos pensadores, llegaremos a una visión reveladora: la cognición humana, sin duda, puso en nuestras manos una fuerza poderosa que, con el tiempo, nos elevó al estatus de especie dominante en todo el mundo. Pero esas facultades mentales que nos permiten modelar, moldear e innovar son justamente las mismas que acaban con una escasez de miras que nos mantendría anclados en el presente. La habilidad de manipular el entorno deliberadamente nos brinda la capacidad de cambiar nuestro punto de vista, de suspendernos sobre la línea del tiempo para contemplar lo que fue, para imaginar lo que será. Por mucho

que quisiéramos que se resolviera de otro modo, llegar al «pienso, luego existo» nos lleva replicar: «pienso, luego moriré».

Darse cuenta de esto es, como poco, desconcertante. Pero la mayoría de nosotros podemos asumirlo. Y nuestra supervivencia como especie atestigua que también nuestros congéneres han sabido aceptarlo. Pero ¿cómo lo conseguimos?[6]. Según una línea de pensamiento, nos explicamos una y otra vez historias en las que nuestra posición en el vasto escenario del universo migra para ocupar el lugar central, en las que la posibilidad de que seamos borrados para siempre es desafiada o ignorada, o, por decirlo llanamente, no está en las cartas. Creamos obras de pintura, escultura, movimiento y música con las que arrebatamos el control de la creación y nos investimos con el poder de triunfar sobre todo lo finito. Concebimos héroes, de Hércules a sir Gawain o Hermione, que desdeñan la muerte con férrea resolución y demuestran, aunque sea con la fantasía, que podemos conquistar. Desarrollamos la ciencia, y hacemos acopio de conocimiento sobre el funcionamiento de la realidad que transformamos en poderes que generaciones anteriores reservaban a los dioses. En pocas palabras, conseguimos gozar de esa capacidad cognitiva a pesar de que, entre tantas otras cosas, revele nuestro dilema existencial. Gracias a nuestra creatividad hemos desarrollados unas defensas formidables contra lo que, de otro modo, podría haber degenerado en un enervante desasosiego.

En cualquier caso, como sea que los motivos no se conservan en los fósiles, buscar qué ha inspirado el comportamiento humano puede ser una tarea espinosa. Tal vez nuestros escarceos creativos, de los ciervos de Lascaux a las ecuaciones de la relatividad general, emerjan de la capacidad cerebral, surgida de la selección natural pero exageradamente activa, de detectar patrones y organizarlos de una forma coherente. Quizá estos y otros devaneos no sean más que subproductos exquisitos pero adaptativamente superfluos de un cerebro grande, liberado de la ocupación constante de buscar refugio y alimento. Como veremos, no faltan teorías, pero las conclusiones incontestables nos eluden. De lo que no cabe duda es de que imaginamos y creamos y experimentamos obras, de las pirámides de Egipto a la Novena sinfonía o la mecánica cuántica, que son monumentos al ingenio humano, cuya durabilidad, si no su contenido, apuntan a la permanencia.

Y con ello, tras considerar los orígenes cósmicos, explorar la formación de átomos, estrellas y planetas, y transitar por el origen de la vida, la conciencia y la cultura, llevaremos la mirada hacia ese dominio que durante

miles de años, dicho de forma literal y simbólica, ha estimulado y, al mismo tiempo, calmado nuestra ansiedad cósmica: miraremos de aquí a la eternidad.

Información, conciencia y eternidad

La eternidad nos cae muy lejos y es mucho lo que tiene que acontecer por el camino. Los futuristas más ardorosos y los espectáculos de ciencia ficción de Hollywood imaginan cómo podrían ser la vida y la civilización en un tiempo futuro que, aunque significativo para la experiencia humana, palidece en comparación con las escalas de tiempo cósmicas. Extrapolar un corto período de innovación tecnológica exponencial hacia progresos futuros es un pasatiempo entretenido, pero es más que probable que esas predicciones difieran profundamente de lo que realmente vaya a ocurrir. Y eso para períodos relativamente familiares, de décadas, siglos o milenios. A escalas de tiempo cósmicas, predecir ese tipo de detalles es un ejercicio vano. Por suerte, para casi todo lo que exploraremos aquí, nos situaremos sobre un terreno más firme. Mi intención es que pintemos el futuro del universo con colores vivos, pero solo con el más grueso de los pinceles. Con ese nivel de detalle, podremos representar las posibilidades con un grado de confianza razonable.

Es esencial que reconozcamos que poco sosiego emocional se puede conseguir si dejamos huellas para un futuro en el que no quede nadie que pueda verlas. El futuro que tendemos a imaginar, aunque sea de manera implícita, está poblado de las cosas que nos importan. La evolución empujará la vida y la mente a adoptar toda suerte de formas sustentadas en todo tipo de plataformas: biológicas, computacionales, híbridas, y quién sabe qué más. Pero con independencia de los detalles impredecibles de composición física o del entorno, la mayoría de nosotros imaginamos que en un futuro muy lejano existirá vida de algún tipo, y en particular vida pensante.

Y esto plantea una pregunta que nos acompañará durante todo el viaje: ¿puede el pensamiento consciente persistir de manera indefinida? ¿O acaso la mente pensante, como el lobo marsupial o el picamaderos picomarfil, es algo sublime que alcanza su auge en un cierto tiempo pero luego se extingue? No me refiero a ninguna conciencia individual, así que la pregunta no tiene nada que ver con anheladas tecnologías (criogénicas, digitales, o lo que sea) capaces de preservar una mente concreta. Lo que me pregunto es si el

fenómeno del pensamiento, sustentado por un cerebro humano o por una computadora inteligente o por partículas entrelazadas que flotan en el vacío o por cualquier otro proceso físico que resulte ser relevante, puede persistir un tiempo arbitrariamente largo en el futuro.

¿Por qué no habría de hacerlo? Pensemos en la encarnación del pensamiento en los humanos. Surgió en conjunción con una lista fortuita de condiciones ambientales que explican, por ejemplo, por qué nuestro pensamiento tiene lugar aquí y no en Mercurio o en el cometa Halley. Pensamos aquí porque aquí las condiciones son apropiadas para la vida y el pensamiento, y por eso son tan preocupantes los cambios perniciosos en el clima de la Tierra. Lo que ya no resulta evidente es que existe una versión cósmica de esas preocupaciones graves pero provincianas. Cuando se concibe el pensamiento como un proceso físico (una suposición que examinaremos), no resulta sorprendente que solo pueda darse si se satisfacen ciertas condiciones ambientales estrictas, sea en la Tierra de aquí y ahora o en cualquier otro lugar y tiempo. Así que cuando tomemos en consideración la evolución a grandes rasgos del universo, nos preguntaremos si las condiciones ambientales, que irán cambiando en el tiempo y el espacio, podrán sustentar de forma indefinida la vida inteligente.

Examinaremos esta cuestión a la luz del conocimiento derivado de la investigación en física de partículas, astrofísica y cosmología, que nos permite predecir cómo se desarrollará el universo a lo largo de períodos que empequeñecen la línea del tiempo desde el Big Bang. Hay, desde luego, incertidumbres sustanciales, y como la mayoría de los científicos, vivo para la posibilidad de que la naturaleza enmiende nuestra soberbia y nos revele sorpresas que hoy ni siquiera podemos imaginar. Pero a partir de lo que hemos medido, observado y calculado, lo que descubrimos, como veremos en los capítulos 9 y 10, no es alentador. Los planetas y estrellas, los sistemas solares y las galaxias, incluso los agujeros negros, son transitorios. El final de cada uno viene dado por su propia combinación particular de procesos físicos, de la mecánica cuántica a la relatividad general, pero en último término nos dejan una bruma de partículas a la deriva en un cosmos frío y quieto.

¿Qué le pasará al pensamiento consciente en un universo que experimenta esa transformación? El lenguaje para preguntar y responder a esta pregunta nos lo ofrece, una vez más, la entropía. Y si le seguimos el rastro nos encontramos con la posibilidad muy real de que el propio acto de pensar, realizado por la entidad que sea en el lugar que sea, podría quedar imposibilitado por una inevitable acumulación de desechos ambientales: en el

futuro lejano, cualquier cosa que piense podría quemarse en el propio calor generado por sus pensamientos. El propio pensamiento se convertiría en algo físicamente imposible.

Aunque el argumento en contra del pensamiento permanente estará basado en un conjunto conservador de suposiciones, también tomaremos en cuenta alternativas, futuros posibles más favorables para la vida y el pensamiento. Pero la lectura más directa nos lleva a pensar que la vida, y en particular la vida inteligente, es efímera. El intervalo de la línea de tiempo cósmica en el que las condiciones permiten la existencia de seres que piensan sobre sí mismos podría ser extraordinariamente breve. En un vistazo rápido a toda la línea del tiempo, la vida se podría pasar por alto. Quizá la descripción que nos da Nabokov de la vida humana como «un breve resquicio de luz entre dos eternidades de oscuridad»[7] se pueda aplicar también al propio fenómeno de la vida.

Lamentamos nuestra transitoriedad y nos consolamos con una trascendencia simbólica, el legado de haber participado en el viaje. No estaremos allí, pero estarán otros, y lo que nosotros hacemos y creamos, lo que dejemos tras la muerte, contribuirá a lo que será y a cómo vivirá la vida en el futuro. Pero en un universo que finalmente acabe despojado de vida y conciencia, también ese legado simbólico, ese murmullo dirigido a nuestros descendientes lejanos, se desvanecerá en el vacío.

¿Dónde nos deja eso?

Reflexiones sobre el futuro

Tendemos a absorber intelectualmente los descubrimientos sobre el universo. Cuando aprendemos algo nuevo sobre el tiempo o las teorías unificadas o los agujeros negros, por un instante nos excita la mente, y, si nos impresiona lo bastante, se nos queda grabado. La naturaleza abstracta de la ciencia nos lleva a menudo a sumergirnos en su contenido de forma cognitiva, y solo después, y raramente, ese conocimiento tiene la oportunidad de tocarnos de manera visceral. Pero cuando la ciencia alía razón y emoción, el fruto puede resultar poderoso.

Para muestra, un botón. Hace algunos años, cuando empecé a pensar sobre las predicciones científicas acerca del futuro lejano del universo, mi

experiencia era sobre todo cerebral. Me empapé de todo el material relevante como una serie fascinante pero abstracta de ideas y conocimientos derivados de la matemática de las leyes de la naturaleza. Sin embargo, descubrí que si «realmente» me forzaba a imaginar de verdad toda la vida, todo el pensamiento, toda la lucha y todos los logros como una efímera aberración en una línea del tiempo cósmica por lo demás despojada de vida, lo absorbía de un modo distinto. Podía de verdad sentirlo. Y no me importa confesar que las primeras veces que fui por ahí, el viaje resultó oscuro. A lo largo de décadas de estudio e investigación científica, a menudo he gozado de momentos de entusiasmo y fascinación, pero nunca antes unos resultados de la matemática y la física me habían sobrecogido con un terror descarnado.

Con el tiempo, mi implicación emocional con estas ideas se ha ido refinando. Ahora, cada vez más, contemplar el futuro lejano me deja con una sensación de calma y conexión, como si mi propia identidad apenas importase porque ha quedado subsumida en lo que solo puedo describir como un sentimiento de gratitud por el regalo de la experiencia. Como, con toda probabilidad, el lector no me conocerá personalmente, me permitirá que le dé un poco de contexto. Soy una persona de espíritu abierto, con una sensibilidad que exige rigor. Provengo de un mundo en el que las aserciones se apoyan en ecuaciones y datos replicables, un mundo en el que la validez viene determinada por cálculos sin ambigüedad que arrojan predicciones que concuerdan con experimentos dígito a dígito, en ocasiones con hasta doce decimales. Así que la primera vez que experimenté uno de esos momentos de calma conexión (me encontraba en un Starbucks en la ciudad de Nueva York), mi reacción fue de profundo recelo. Quizá mi té *earl grey* estaba estropeado por una leche de soja en mal estado. O quizá se me estaba yendo la cabeza.

Tras pensarlo, comprendí que no era nada de eso. Somos el resultado de un largo linaje que ha aliviado su incomodidad existencial imaginando que dejamos huella. Y cuanto más duradera es esta, cuanto más indeleble la marca, más parece que la vida realmente importa. En las palabras del filósofo Robert Nozick (pero que fácilmente podrían ser de George Bailey), «la muerte te borra… Ser borrado completamente, incluidos los rastros que uno deja, se acerca mucho a destruir el sentido de la propia vida»**[8]**. Especialmente para quienes, como yo, carecemos de una orientación religiosa tradicional, el énfasis en no ser «borrado», la continua preocupación por permanecer, puede impregnarlo todo. Mi educación, mi formación, mi carrera profesional, mis experiencias, todo lo ha teñido. A cada paso, he avanzado

con la vista puesta en la lejanía, buscando un logro que perdure. A nadie debe sorprender que mi ocupación profesional haya estado dominada por análisis matemáticos del espacio, el tiempo y las leyes de la naturaleza; es difícil imaginar otra disciplina que más fácilmente mantenga día tras día el pensamiento enfocado en preguntas que trascienden el momento. Pero el propio descubrimiento científico proyecta esta perspectiva con una luz muy distinta. Vida y pensamiento probablemente no ocupen más que un minúsculo oasis en el tiempo cósmico. Aunque gobernado por elegantes leyes matemáticas que permiten todo tipo de prodigiosos procesos físicos, el universo solo acogerá la vida y la mente de manera temporal. Si uno asume eso plenamente, si imagina un futuro desprovisto de estrellas y planetas y cosas que piensan, su apreciación de nuestra propia era se acercará a la reverencia.

«Eso» fue lo que sentí en el Starbucks. La calma y la conexión marcaban un cambio, el de pasar de intentar aprehender un futuro que se desvanece a sentir que habitamos un presente magnífico, por bien que transitorio. Fue, para mí, un cambio compelido por la contrapartida cosmológica a las enseñanzas que, durante siglos, nos han ofrecido poetas y filósofos, escritores y artistas, sabios espirituales y maestros de la conciencia plena, entre muchos otros, que nos dicen la verdad simple pero sorprendentemente sutil de que la vida está en el aquí y el ahora. Es un marco mental que cuesta mantener, pero que ha influido en el pensamiento de muchos. Lo vemos en el «un para siempre está hecho de ahoras»[9], de Emily Dickinson, y en la «eternidad en cada momento», de Thoreau[10]. Es, a mi entender, una perspectiva que se hace especialmente palpable cuando uno se sumerge en la plena vastedad del tiempo, de principio a fin, un telón de fondo cosmológico que aporta una claridad incomparable a la percepción de lo singular y efímero que es realmente el aquí y ahora.

El propósito de este libro es el de aportar esa claridad. Viajaremos a través del tiempo, desde el mejor conocimiento que poseemos del principio hasta lo más cerca del final último que nos pueda llevar la ciencia. Exploraremos cómo surgen la vida y la mente del caos primigenio, y nos centraremos entonces en lo que hace un conjunto de mentes curiosas, apasionadas, ansiosas, autorreflexivas y escépticas, sobre todo cuando se percatan de su propia mortalidad. Examinaremos el auge de la religión, el deseo de expresión creativa, el ascenso de la ciencia, la búsqueda de la verdad y el anhelo de lo intemporal. La muy arraigada afinidad por algo permanente, por lo que Franz Kafka identificó como nuestra necesidad de «algo indestructible»[11], nos

empujará entonces en nuestro viaje hacia el futuro lejano y nos permitirá evaluar las expectativas para todo aquello que estimamos, todo lo que constituye la realidad tal como la conocemos, desde planetas y estrellas, desde galaxias y agujeros negros, hasta la vida y la mente.

A lo largo del viaje, brillará el espíritu humano del descubrimiento. Somos exploradores ambiciosos e intentamos comprender una vasta realidad. Siglos de esfuerzo han arrojado luz sobre oscuros territorios de la materia, la mente y el cosmos. Durante los próximos miles de años, las esferas de iluminación se harán mayores y más brillantes. Lo que llevamos de viaje ya ha desvelado realidad gobernada por leyes matemáticas que son indiferentes a códigos de conducta, a estándares de belleza, a la necesidad de compañía, al anhelo de conocimiento y a la búsqueda de propósito. Sin embargo, por medio del lenguaje y el relato, el arte y el mito, la religión y la ciencia, hemos aprovechado nuestra pequeña parcela del desapasionado, incesante y mecánico despliegue del cosmos para dar voz a nuestra omnipresente necesidad de coherencia, valor y significado. Es una contribución temporal pero exquisita. Tal como pondrá de manifiesto nuestro viaje por el tiempo, la vida probablemente sea transitoria, y casi con seguridad todo el conocimiento que surgió tras su aparición se desvanecerá cuando encuentre su final. Nada es permanente. Nada es absoluto. Y por ello, en la búsqueda de valor y propósito, las únicas ideas relevantes, las únicas respuestas preñadas de significado, son las que nosotros mismos alcanzamos. En último término, durante nuestra breve estancia bajo el sol, la noble tarea que se nos encomienda es la de hallar nuestro propio sentido.

Iniciemos, pues, nuestro viaje.

2

EL LENGUAJE DEL TIEMPO

Pasado, futuro y cambio

En la noche del 28 de enero de 1948, entre una interpretación del «Cuarteto en la menor» de Schubert y una presentación de canciones populares inglesas, la radio de la BBC emitió un debate entre una de las fuerzas intelectuales más potentes del siglo XX, Bertrand Russell, y el sacerdote jesuita Frederick Copleston. ¿El tema? La existencia de Dios[1]. Russell, cuyas innovadoras obras sobre filosofía y los principios humanitarios lo harían merecedor del premio Nobel de Literatura en 1950, y cuyas iconoclastas opiniones políticas y sociales le valdrían el despido tanto de la Universidad de Cambridge como del City College de Nueva York, aportó numerosos argumentos para cuestionar, si no rechazar, la existencia de un creador.

Una línea de argumentación que apoyaba la posición de Russell es relevante para lo que aquí discutimos. «De acuerdo con la evidencia científica —observaba Russell—, el universo se ha arrastrado por lentos estadios hasta un resultado un tanto deplorable en esta Tierra, y seguirá arrastrándose a lo largo de estadios aún más deplorables hasta la condición de muerte universal»[2]. El hilo teológico lo hilvanaremos en capítulos posteriores. Aquí quiero centrarme en la referencia de Russell a los indicios científicos de una «muerte universal». Tiene su origen en un descubrimiento del siglo XIX con raíces tan humildes como profundas son sus conclusiones.

A mediados del siglo XIX, la revolución industrial estaba en pleno apogeo y, en los paisajes de fábricas y talleres, la máquina de vapor se había convertido en el motor principal de la producción. Sin embargo, a pesar del gran salto del trabajo manual al mecánico, la eficiencia de la máquina de

vapor, es decir, el trabajo útil realizado en comparación con la cantidad de combustible consumido, resultaba bastante pobre. Aproximadamente el 95 % del calor generado por la combustión de la madera o el carbón se perdía en el entorno como un residuo. Esto inspiró a una serie de científicos a pensar profundamente en los principios físicos que gobernaban las máquinas de vapor, con el fin de encontrar la forma de quemar menos y conseguir más. A lo largo de muchas décadas, sus investigaciones los llevaron de manera paulatina a un resultado icónico que se ha hecho merecidamente célebre: la segunda ley de la termodinámica.

En términos (muy) coloquiales, esta ley declara que la producción de residuos es inevitable. Y lo que hace que la segunda ley sea tan importante es que las máquinas de vapor sirvieron de catalizador para enunciarla, pero la ley es universalmente aplicable. La segunda ley describe una característica fundamental inherente a toda la materia y la energía, con independencia de su forma o estructura, y de si es animada o inanimada. La ley revela (una vez más, en términos muy laxos) que todo en el universo está sometido a una abrumadora tendencia a decaer, a degradarse y marchitarse.

Así enunciado, es obvio a qué se refería Russell. El futuro no parece prometer más que un continuo deterioro, una imparable conversión de energía productiva en calor inútil, un paulatino agotamiento, por así decirlo, de las baterías que alimentan la realidad. Pero una comprensión más precisa de la ciencia revela que este resumen de hacia dónde se dirige la realidad oculta una rica y matizada progresión que se viene desarrollando desde el Big Bang y lo seguirá haciendo en el futuro. Es una progresión que ayuda a explicar nuestro lugar en la línea de tiempo cósmica, que clarifica cómo se puede producir belleza y orden contra el telón de fondo de la degradación y la decadencia, y que también nos brinda posibles maneras, por extrañas que puedan parecer, de eludir el sórdido final al que se refería Russell. Dado que esta ciencia, que incluye conceptos como entropía, información y energía, es la que nos guiará en buena parte de nuestro viaje, merece la pena que dediquemos un poco de tiempo a entenderla más a fondo.

Máquinas de vapor

Está lejos de mi intención sugerir que hayamos de encontrar el significado de la vida escondido en las sudorosas profundidades de una ruidosa máquina de vapor. Pero para comprender cómo la energía, en la forma y el contexto que sea, evoluciona en el tiempo, resultará indispensable entender la capacidad de la máquina de vapor para absorber el calor que produce la quema de un combustible y usarlo para impulsar repetidamente el movimiento de las ruedas de una locomotora o de la bomba de una mina de carbón. Y la forma en que evoluciona la energía tiene mucho que ver con el futuro de la materia, la mente y toda la estructura del universo. Así pues, descendamos desde los elevados dominios de la vida y la muerte, el propósito y el sentido, hasta el incesante resoplar y rechinar de la máquina de vapor del siglo XIX.

La base científica de esta máquina es simple pero ingeniosa: el vapor de agua se expande al calentarse, así que empuja hacia fuera. Una máquina de vapor aprovecha esta acción calentando un cilindro lleno de vapor tapado con un pistón bien ajustado que puede deslizarse arriba y abajo por la superficie interior del cilindro. A medida que el vapor de agua se calienta y se expande, empuja con fuerza contra el pistón, y este empuje hacia fuera es el que hace que una rueda gire, un molino muela o un telar teja. Entonces, tras haber gastado energía durante este proceso de empuje hacia fuera, el vapor se enfría y el pistón se desliza de vuelta a su posición inicial, donde queda preparado para ser empujado otra vez cuando el vapor vuelva a calentarse, en un ciclo que se repetirá mientras haya combustible para calentar de nuevo el vapor[3].

La historia nos explica el papel central de este ingenio en la revolución industrial, pero las cuestiones que planteó para la ciencia fundamental fueron igualmente importantes. ¿Podemos entender la máquina de vapor con precisión matemática? ¿Hay algún límite a lo eficiente que puede ser la conversión de calor en trabajo útil? ¿Hay aspectos de los procesos básicos de la máquina de vapor que sean independientes de los detalles de su diseño mecánico o de los materiales utilizados y que, por tanto, nos refieran a principios físicos universales?

Al meditar sobre estas cuestiones, el físico e ingeniero militar francés Sadi Carnot fundó el campo de la termodinámica, la ciencia del calor, la energía y el trabajo. Nadie lo habría dicho a la vista de las ventas de su tratado de 1824, *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego,* [4] pero, aunque tardaron en cuajar, sus ideas habrían de inspirar durante el siglo siguiente a los científicos que desarrollaron una perspectiva de la física totalmente nueva.

Una perspectiva estadística

La tradición científica tradicional, expresada de forma matemática por Isaac Newton, es que las leyes físicas proporcionan predicciones fuertes de cómo se mueven las cosas. Si conocemos la posición y velocidad de un objeto en un momento determinado y las fuerzas que actúan sobre él, las ecuaciones de Newton predicen la trayectoria que seguirá el objeto. Es igual que se trate de la Luna atraída por la gravedad de la Tierra o de una pelota de béisbol enviada al centro del campo: las observaciones confirman que las predicciones son exactas.

Pero hay un problema. Cualquiera que haya estudiado física en el instituto recordará (a lo mejor) que cuando analizamos las trayectorias de objetos macroscópicos solemos suponer, aunque calladamente, un buen número de simplificaciones. En el caso de la Luna y la pelota de béisbol, ignoramos su estructura interna e imaginamos en ambos casos que se trata de una única partícula de masa. Es una burda simplificación. Hasta un grano de sal contiene alrededor de un millón de billones de moléculas, ¡y eso solo un grano! Sin embargo, al examinar la órbita de la Luna no solemos preocuparnos por la agitación de esta o aquella molécula en el mar de la Tranquilidad. Cuando pensamos en el ascenso de la pelota de béisbol, no ponemos atención en cómo vibran las moléculas de su interior de corcho. Lo único que nos importa es el movimiento general de la Luna o de la pelota. Y para eso basta con aplicar las leyes de Newton a los modelos simplificados[5].

Estos éxitos subrayan el desafío al que se enfrentaron los físicos del siglo XIX que estudiaron las máquinas de vapor. El vapor caliente que empuja el pistón del motor está formado por una ingente cantidad de moléculas de agua, del orden de un billón de billones de partículas. No podemos ignorar esta estructura interna como hacemos en nuestro análisis de la Luna o la pelota de béisbol porque es el movimiento de esas partículas (al chocar contra el pistón, rebotar en su superficie, golpear las paredes del cilindro, correr de nuevo hacia el pistón) lo que está en el meollo del funcionamiento del motor. El problema es que nadie, en ningún lugar, por inteligente que sea o por formidables que sean las computadoras que utilice, puede calcular todas las trayectorias individuales que sigue un conjunto tan enorme de moléculas de agua.

¿Hemos llegado a un callejón sin salida?

Podría parecer que sí. Pero nos salva un cambio de perspectiva. Los grandes conjuntos permiten a veces grandes simplificaciones. Es difícil, si no imposible, predecir cuándo volveremos a estornudar. Sin embargo, si ampliamos nuestra visión al conjunto mayor de todos los seres humanos de la Tierra, «podemos» predecir que en el próximo segundo se producirán aproximadamente ochenta mil estornudos en todo el mundo[6]. Lo importante es que si adoptamos una perspectiva estadística, la gran población de la Tierra se convierte en la clave, no en el obstáculo, del poder predictivo. Los grandes grupos a menudo exhiben regularidades estadísticas que están ausentes a nivel individual.

Un enfoque análogo para grandes grupos de átomos y moléculas fue el que empezaron a explorar James Clerk Maxwell, Rudolf Clausius, Ludwig Boltzmann y muchos de sus colegas, quienes propusieron que se dejara a un lado la consideración detallada de las trayectorias individuales en favor de enunciados estadísticos que describen el comportamiento promedio de grandes conjuntos de partículas, y demostraron que este enfoque no solo hace que los cálculos matemáticos sean factibles, sino que, sobre todo, las propiedades físicas así cuantificadas son las que realmente importan. La presión que empuja el pistón de una máquina de vapor, por ejemplo, apenas se ve afectada por la trayectoria precisa de esta o aquella molécula de agua individual, sino que surge del movimiento promedio de billones y billones de moléculas que chocan cada segundo contra su superficie. «Eso» es lo que realmente importa. Y «eso» es lo que el enfoque estadístico permitía calcular a los científicos.

En los tiempos que corren, en que las encuestas políticas, la genética de poblaciones y, en general, el uso de datos masivos son comunes, el cambio a una perspectiva estadística puede no parecer radical. Nos hemos acostumbrado al poder de lo que nos cuenta la estadística mediante el estudio de grandes conjuntos. Pero en el siglo XIX y a principios del siglo XX, la argumentación estadística se alejaba de la precisión rígida que entonces definía la física. Hay que tener en cuenta, además, que hasta los primeros años del siglo XX todavía hubo físicos respetados que ponían en duda la existencia de átomos y moléculas, que son el fundamento mismo del enfoque estadístico.

A pesar de los negacionistas, el enfoque estadístico no tardó en demostrar su valía. En 1905, el propio Einstein explicó cuantitativamente el movimiento agitado de los granos de polen suspendidos en un vaso de agua invocando para ello el incesante bombardeo de las moléculas de H_2O. Tras este éxito,

había que ser un opositor de tomo y lomo para dudar de la existencia de las moléculas. Y lo que es más, un creciente archivo de artículos teóricos y experimentales revelaron que las conclusiones basadas en el análisis estadístico de grandes conjuntos de partículas (para describir cómo rebotan en el interior de recipientes y, a causa de ello, ejercen presión sobre su superficie, o adquieren cierta densidad, o se relajan hasta cierta temperatura) concordaban con los datos de manera tan precisa que, sencillamente, no había razón alguna para cuestionar la capacidad explicativa del enfoque. Así nacía la base estadística de los procesos térmicos.

Todo esto fue un gran triunfo que permitió a los físicos entender no ya las máquinas de vapor, sino una gran variedad de sistemas térmicos, desde la atmósfera de la Tierra a la corona solar o la vasta colección de partículas que se mueven en el interior de una estrella de neutrones. Pero ¿qué relación guarda todo esto con la visión de Russell sobre el futuro, con su pronóstico de una Tierra que se arrastra hacia la muerte? Buena pregunta. Y nos estamos acercando, pero hay que tener paciencia. Todavía nos faltan un par de pasos. El siguiente consiste en usar estos avances para arrojar luz sobre la quintaesencia del futuro, que es que difiere profundamente del pasado.

De esto en aquello

La distinción entre pasado y futuro es tan básica como crucial para la experiencia humana. Nacimos en el pasado. Moriremos en el futuro. En medio, somos testigos de innumerables acontecimientos que se desarrollan a través de una secuencia de eventos que, considerada en el orden inverso, nos parecería absurda. Van Gogh pintó *La noche estrellada*, pero no podría haber desprendido los remolinos de colores con pinceladas inversas para restablecer un lienzo vacío. El *Titanic* rozó un iceberg que rasgó el costado de su casco, pero no habría podido invertir entonces los motores, dar marcha atrás y deshacer los daños. Cada uno de nosotros crece y envejece, pero no podemos mover hacia atrás las manillas de nuestros relojes internos y recuperar la juventud.

Visto el lugar central que ocupa la irreversibilidad en los cambios, uno pensaría que no debe ser difícil identificar su origen matemático en las leyes de la física. Deberíamos poder señalar algo específico en las ecuaciones que

garantice que, aunque las cosas puedan transformarse de «esto» en «aquello», la matemática prohíba que puedan transformarse de «aquello» en «esto». Sin embargo, durante siglos las ecuaciones que desarrollamos no lograron ofrecernos nada por el estilo. Al contrario, aunque las leyes de la física se han ido refinando continuamente de la mano de Newton (mecánica clásica), Maxwell (electromagnetismo), Einstein (física relativista) y docenas de científicos responsables de la mecánica cuántica, hay una característica que se ha mantenido inamovible: las leyes siempre se han mantenido firmes en su total insensibilidad hacia lo que los humanos llamamos futuro y lo que llamamos pasado. Una vez definido el estado del mundo en la actualidad, las ecuaciones matemáticas tratan del mismo modo el cambio hacia el futuro que hacia el pasado. Aunque a nosotros esa distinción nos importa, y profundamente, las leyes encogen los hombros ante la diferencia, la evalúan con si no tuviera más importancia que el hecho de que el reloj de un estadio marque el tiempo que ha pasado o el tiempo que falta. Eso significa que si las leyes permiten que ocurra una secuencia concreta de eventos, necesariamente permiten también la secuencia inversa[7].

Cuando siendo estudiante aprendí esto, me pareció poco menos que absurdo. En el mundo real no vemos saltadores olímpicos saliendo de la piscina, pies por delante, para posarse dulcemente sobre la palanca. No vemos fragmentos de vidrio tintado saltando del suelo para componer una lámpara Tiffany. Las secuencias de cine proyectadas al revés hacen gracia justamente porque lo que vemos difiere enormemente de todo lo que experimentamos. Y, sin embargo, de acuerdo con las matemáticas, los eventos representados en las secuencias invertidas cumplen a rajatabla las leyes de la física.

Pero entonces ¿por qué nuestra experiencia es tan asimétrica? ¿Por qué siempre vemos que los eventos se desarrollan en una dirección temporal y nunca en la contraria? Una parte fundamental de la respuesta viene dada por la idea de «entropía», un concepto que resultará esencial para entender el desarrollo del cosmos.

La entropía: primera aproximación

La entropía es uno de los conceptos más confusos de la física fundamental, aunque eso no haya apagado el apetito cultural por invocarla libremente para

describir situaciones cotidianas que han evolucionado del orden al caos o, de forma todavía más simple, de lo bueno a lo malo. Como uso coloquial, está bien; a veces, hasta yo he apelado a la entropía de ese modo. Pero como el concepto científico de entropía nos va a acompañar en nuestro viaje, y como además se encuentra en el núcleo de la negra visión de Russell sobre el futuro, conviene que examinemos su significado con mayor precisión.

Comencemos por una analogía. Imaginemos que sacudimos vigorosamente una bolsa que contiene cien monedas y luego las esparcimos sobre la mesa del comedor. Si todas las monedas mostrasen la cara, nos sorprendería. Pero ¿por qué? Parece obvio, pero vale la pena que lo pensemos. La ausencia de una sola cruz significaría que cada una de las cien monedas, después de saltar, chocar y dar vueltas al azar, acaban cayendo sobre la mesa con la cara hacia arriba. Todas. Eso es difícil. Obtener ese resultado particular y único no parece fácil. En comparación, pensemos en un resultado ligeramente distinto, por ejemplo que haya una cruz (y las otras noventa y nueve monedas sean caras). Hay cien maneras distintas de que eso ocurra: esa única cruz puede corresponder a la primera moneda, a la segunda, a la tercera, y así hasta la que hace cien. Así pues, obtener noventa y nueve caras es cien veces más fácil, es decir, cien veces más probable, que obtener solamente caras.

Continuemos. Un simple cálculo revelará que hay 4950 maneras distintas de obtener dos cruces (primera y segunda moneda, primera y tercera, segunda y tercera, primera y cuarta, y así sucesivamente). Un nuevo cálculo nos dirá que hay 161 700 maneras distintas de que tres de las monedas sea cruces, casi 4 millones de maneras de obtener cuatro cruces, y unos 75 millones de maneras de conseguir cinco cruces. Los detalles de los números no importan: es la tendencia lo que nos interesa. Cada nueva cruz nos da un conjunto mayor de combinaciones que se ajustan al resultado. Muchísimo mayor. La cifra alcanza un pico con cincuenta cruces (y cincuenta caras), un suceso para el cual hay alrededor de cien mil millones de trillones de combinaciones posibles (exactamente 100 891 344 545 564 193 334 812 497 256 combinaciones[8]). Por consiguiente, obtener cincuenta caras y cincuenta cruces es cien mil millones de trillones de veces más probable que obtener todo caras.

Por «eso» es tan sorprendente que salgan cien caras.

Mi explicación se basa en el hecho de que la mayoría de nosotros intuitivamente analizamos el conjunto de monedas tal como Maxwell y Boltzmann sostenían que se debía analizar un cilindro lleno de vapor de agua.

Del mismo modo que los científicos renuncian a analizar el vapor de agua molécula a molécula, nosotros no solemos analizar un conjunto aleatorio de monedas una por una. Ni notamos ni nos importa si ha salido cara en la moneda 29 o en la 71. Miramos el conjunto de monedas como un todo. Y la característica que llama nuestra atención es el número de caras en comparación con el número de cruces: ¿Hay más caras que cruces o más cruces que caras? ¿El doble? ¿Tres veces más? ¿Un número más o menos parecido? Podemos detectar cambios significativos en la razón entre caras y cruces, pero las reordenaciones aleatorias que preserven esa razón (como darle la vuelta a las monedas 23, 46 y 92 de cara a cruz al mismo tiempo que cambiamos las monedas 17, 52 y 81 de cruz a cara) son prácticamente indistinguibles. En consecuencia, he dividido los resultados posibles en grupos, cada uno de ellos con aquellas configuraciones de monedas que tienen el mismo aspecto, y he enumerado el número de miembros de cada grupo: he contado el número de resultados sin ninguna cruz, el número de resultados con una cruz, con dos cruces, y así sucesivamente, hasta el número de resultados con cincuenta cruces.

Lo importante es que estos grupos no contienen el mismo número de miembros. Ni de lejos. Por eso nos sorprende que una tirada de monedas al azar no nos dé ni una sola cruz (un grupo con un único miembro), nos sorprende algo menos encontrar una sola cruz (un grupo con cien miembros), menos aún que el resultado contenga dos cruces (un grupo con 4950 miembros), y bostezamos de aburrimiento si sale el mismo número de caras que de cruces (un grupo con unos cien mil millones de trillones de miembros). Cuanto mayor es el número de miembros de un grupo, más probable es que un resultado al azar pertenezca a ese grupo. El tamaño del grupo importa.

Si para alguien esto resulta nuevo, quizá no comprenda que acabamos de ilustrar el concepto esencial de la entropía. La entropía de una configuración dada de monedas es el tamaño de su grupo, el número de configuraciones que nos dan básicamente el mismo resultado[9]. Si hay muchas maneras de obtener lo mismo, esa configuración tiene una entropía elevada. Si hay pocas maneras, la configuración en cuestión tiene una entropía baja. A igualdad de condiciones, una tirada al azar es más probable que pertenezca a un grupo con entropía más alta porque esos grupos tienen más miembros.

Esta formulación también se relaciona con los usos coloquiales de la entropía a los que me he referido al principio de esta sección. De manera intuitiva, las configuraciones desordenadas (pensemos en un escritorio caótico

lleno de documentos, bolígrafos y clips esparcidos por la superficie) tiene una entropía alta porque hay muchas configuraciones de los constituyentes que dan una apariencia parecida: si movemos al azar los elementos de una configuración desordenada, sigue pareciendo desordenada. Las configuraciones ordenadas (pensemos en un escritorio perfectamente arreglado, con todos los documentos, bolígrafos y clips debidamente agrupados en los lugares que les corresponden) tienen una entropía baja porque hay pocas reordenaciones de los constituyentes que den lugar a un aspecto parecido. Igual que con las monedas, la entropía alta nos llama la atención porque hay muchas más maneras de disponer los elementos de forma desordenada que de forma ordenada.

La entropía de verdad

Las monedas son especialmente útiles porque ilustran el enfoque que han desarrollado los científicos para analizar las voluminosas colecciones de partículas que constituyen los sistemas físicos, ya se trate de moléculas de agua que se mueven de un lado para otro en una máquina de vapor caliente o de moléculas de aire que deambulan por la estancia en la que ahora nos encontramos. Como en el caso de las monedas, pasamos por alto los detalles de las partículas individuales (que una molécula concreta de agua o del aire se encuentre aquí o allá apenas importa), y agrupamos las configuraciones de partículas que se parecen mucho. En el caso de las monedas, el criterio del parecido tenía que ver con el cociente entre caras y cruces porque, por lo general, nos importa muy poco la disposición de cualquier moneda particular, y solemos fijarnos únicamente en la apariencia global de la configuración. Pero ¿qué significa que «se parecen mucho» cuando nos referimos a un conjunto grande de moléculas de gas?

Pensemos en el aire que ahora llena la habitación donde estamos. A nadie le importa nada si tal molécula de oxígeno da vueltas junto a la ventana o tal otra molécula de nitrógeno rebota en el suelo. Lo único que nos importa cada vez que inhalamos es que haya un volumen de aire adecuado para satisfacer nuestras necesidades. Bueno, hay un par de cosas más que seguramente nos importan a todos. Si la temperatura del aire fuese tan caliente que nos abrasase los pulmones, no estaríamos muy contentos. Y si la presión del aire

fuese tan alta (y no la hubiésemos compensado todavía con el aire de nuestras trompas de Eustaquio) y nos dolieran los oídos, tampoco estaríamos muy felices. Así pues, lo que nos importa es el volumen de aire, su temperatura y su presión. De hecho, estas son tres cualidades macroscópicas que también han importado a los físicos desde Maxwell y Boltzmann hasta nuestros días.

Así pues, decimos de una serie de configuraciones de un conjunto grande de moléculas de un recipiente que «se parecen mucho» si ocupan el mismo volumen, tienen la misma temperatura y ejercen la misma presión. Igual que con las monedas, agrupamos todas las configuraciones parecidas de moléculas y decimos que cada miembro del grupo produce el mismo «macroestado». La entropía del macroestado es el número de configuraciones parecidas. Suponiendo que no encendemos la calefacción (lo cual afectaría a la temperatura), o cerramos una divisoria impermeable en la estancia (lo cual afectaría al volumen) o bombeamos más oxígeno (lo cual afectaría a la presión), las siempre cambiantes configuraciones de moléculas de aire que deambulan de uno a otro lado de la habitación en la que estamos pertenecen todas al mismo grupo (todas se parecen mucho) porque todas producen las mismas características macroscópicas que ahora mismo experimentamos.

La disposición de partículas en grupos de configuraciones parecidas proporciona un esquema de organización tremendamente potente. Del mismo modo que unas monedas tiradas al azar pertenecen con mayor probabilidad a un grupo con un mayor número de miembros (con mayor entropía), también podemos decir lo mismo de las partículas que dan vueltas al azar. Comprenderlo es tan fácil como profundas son sus implicaciones: tanto si las partículas que rebotan se encuentran en una máquina de vapor, en nuestra habitación o en cualquier otro lugar, si entendemos las características típicas de las configuraciones más comunes (las que pertenecen a grupos con un gran número de miembros), podremos hacer predicciones sobre las cualidades macroscópicas del sistema, que son justamente las que de verdad nos interesan. Estas predicciones son estadísticas, desde luego, pero con una probabilidad extraordinariamente alta de ser exactas. Y lo mejor es que logramos todo esto evitando la insuperable complejidad del análisis de las trayectorias de un número de partículas ridículamente elevado.

Para acabar de desarrollar el concepto, necesitamos afinar nuestra capacidad para discriminar entre configuraciones de partículas comunes (entropía alta) en contraposición a configuraciones raras (entropía baja). Es decir, dado el estado de un sistema físico, necesitamos determinar si hay muchas o pocas reordenaciones de los constituyentes que dejen el sistema con

un aspecto parecido. Como caso de estudio, visitaremos nuestro baño lleno de vapor de agua después de una larga ducha de agua caliente. Para determinar la entropía del vapor, necesitamos contar el número de configuraciones de moléculas (sus posiciones posibles y sus posibles velocidades) que dan lugar a las mismas propiedades macroscópicas, o sea, al mismo volumen, temperatura y presión[10]. Realizar el cálculo matemático para un conjunto de moléculas de H_2O es más complicado que el recuento análogo para un conjunto de monedas, pero es algo que la mayoría de estudiantes de física aprenden a hacer en el segundo año de carrera. Más fácil, y también más iluminador, es el cálculo de cómo el volumen, la temperatura y la presión afectan a la entropía.

Primero, el volumen. Imaginemos que las moléculas de H_2O que andan dando vueltas por el baño están fuertemente agrupadas en un rincón creando un denso grumo de vapor. En esta configuración, las reordenaciones posibles de las moléculas quedan muy limitadas, pues cada vez que las movemos, tenemos que mantenerlas dentro de ese grumo o de lo contrario la configuración «será» distinta. En comparación, cuando el vapor está distribuido uniformemente por el baño, el juego de las sillas musicales está mucho menos restringido. Podemos intercambiar las posiciones de las moléculas que están cerca del tocador con las que flotan por el aplique, las de la cortina de la ducha con las que están suspendidas junto a la ventana, y, en conjunto, el vapor parecerá inalterado. Conviene observar que cuanto mayor sea el baño, mayor será el número de lugares por donde se pueden esparcir las moléculas, y mayor será, por tanto, el número de reordenaciones posibles. La conclusión, pues, es que las configuraciones de moléculas más pequeñas y apretadas tienen una entropía más baja, mientras que las configuraciones más grandes y con distribución uniforme tienen una entropía mayor.

Ahora, la temperatura. A nivel molecular, ¿a qué nos referimos cuando hablamos de temperatura? La respuesta es bien conocida. La temperatura es la velocidad media de un conjunto de moléculas[11]. Una cosa está fría cuando la velocidad media de sus moléculas es baja y caliente cuando la velocidad media es alta. Así pues, determinar cómo afecta la temperatura a la entropía equivale a determinar cómo afecta a la entropía la velocidad media de las moléculas. E igual que para las posiciones de las moléculas, también en este caso tenemos al alcance una evaluación cualitativa. Si la temperatura del vapor es baja, el número de reordenaciones posibles de las velocidades moleculares es comparativamente pequeño: para mantener la temperatura fija y, de este modo, garantizar que las configuraciones sean más o menos iguales,

hay que compensar todo aumento de la velocidad de unas moléculas con una reducción apropiada de la velocidad de otras. Pero el problema de tener una temperatura baja (una velocidad media pequeña) es que no queda mucho margen para reducir velocidades antes de tocar fondo, es decir, el cero. Por consiguiente, la horquilla total de velocidades moleculares posibles queda limitada. En comparación, si la temperatura es alta, el abanico de velocidades moleculares (unas más altas que la media, otras más bajas) es mucho más amplio, con lo que se dispone de más margen para mezclar las velocidades sin alterar la media. Que haya más reordenaciones de las velocidades moleculares que den un resultado muy parecido significa que una temperatura más alta implica una entropía más alta.

Por último, la presión. La que ejerce el vapor de agua sobre nuestra piel o sobre las paredes del baño se debe al impacto de moléculas de H_2O en movimiento cuando topan con estas superficies: cada impacto molecular ejerce un minúsculo empuje, de modo que cuando mayor sea el número de moléculas, mayor será la presión. Así pues, para una temperatura y un volumen dados, la presión viene determinada por el número total de moléculas de vapor que hay en el baño, una cantidad cuyas consecuencias para la entropía se pueden calcular con mucha facilidad. Un número menor de moléculas de H_2O en el baño (una ducha más breve) implica un número menor de reordenaciones posibles, de modo que la entropía es menor; más moléculas de H_2O (una ducha más larga) significan más reordenaciones y, por tanto, una entropía más alta.

En resumen, con menos moléculas, menor temperatura o un volumen menor, la entropía es también menor. Más moléculas, mayor temperatura o un volumen mayor, mayor entropía.

A partir de esta simple ilustración vamos a destacar, si se me permite, un modo de pensar en la entropía que, aunque falto de precisión, proporciona una útil regla general. Debemos esperar encontrarnos a menudo con estados de alta entropía. Como esos estados se pueden conseguir mediante un número enorme de reordenaciones de las partículas constituyentes, son normales, corrientes, fáciles de configurar, adocenados. En cambio, un estado de baja entropía debería llamarnos la atención. Una baja entropía implica que hay muchísimas menos maneras de obtener ese macroestado a partir de sus ingredientes microscópicos y que, por consiguiente, esas configuraciones son difíciles de encontrar, raras, cuidadosamente ordenadas, infrecuentes. Salimos de la ducha y nos encontramos con el vapor uniformemente repartido por el baño: entropía alta, nada reseñable. Salimos de una larga ducha de agua

caliente y nos encontramos todo el vapor concentrado en un pequeño cubo suspendido frente al espejo: baja entropía, absolutamente insólito. Tanto, de hecho, que si nos encontrásemos con una configuración así deberíamos ser muy escépticos sobre la explicación de que simplemente se ha producido una de esas cosas infrecuentes que ocurren de vez en cuando. Esa puede ser la explicación. Pero apostaría mi vida a que no lo es. Del mismo modo que sospecharíamos que alguna razón distinta del azar explica que sobre la mesa nos encontremos con un buen número de monedas con la cara hacia arriba (por ejemplo, que alguien se entretuvo a darle la vuelta a todas las que hubieran caído con la cara hacia abajo), deberíamos buscar una explicación distinta del simple azar para cualquier configuración de baja entropía que encontremos.

Este razonamiento se aplica incluso a lo aparentemente mundano, como encontrarnos con un huevo, un hormiguero o un tazón. La naturaleza ordenada, fabricada, de baja entropía de estas configuraciones pide una explicación. Que el movimiento aleatorio de las partículas apropiadas y precisas las lleve a juntarse para formar un huevo, un hormiguero o un tazón es concebible, pero inverosímil, así que nos sentiremos motivados a buscar explicaciones más convincentes, y, como es natural, no tenemos que ir muy lejos para encontrarlas: el huevo, el hormiguero y el tazón son el resultado de la actividad de distintas formas de vida que han reordenado las configuraciones azarosas de su entorno en forma de estructuras organizadas. Cómo consigue la vida producir un orden tan exquisito es algo de lo que nos ocuparemos en capítulos posteriores. Por el momento, la lección simple es que las configuraciones de baja entropía deben verse como un diagnóstico, una pista de la existencia de poderosas influencias organizadoras que deben ser responsables del orden que encontramos.

A finales del siglo XIX, armados con estas ideas, muchas fruto de su propio ingenio, el físico austríaco Ludwig Boltzmann creyó que podía abordar la pregunta con la que inauguramos esta parte de nuestra discusión: ¿qué distingue el futuro del pasado? Su respuesta se basaba en una cualidad de la entropía articulada por la segunda ley de la termodinámica.

Las leyes de la termodinámica

Mientras que la entropía y la segunda ley de la termodinámica gozan de abundantes referencias culturales, las menciones públicas a la primera ley de la termodinámica no son tan habituales. Sin embargo, para entender de verdad la segunda ley, antes hay que entender bien la primera. Y resulta que esta es bastante conocida también, solo que con otro nombre. Es la ley de la conservación de la energía, y nos dice que hay la misma al principio que al final de un proceso. Hay que ser meticuloso a la hora de contabilizar la energía e incluir todas las formas en las que puede transformarse la energía inicial, por ejemplo energía cinética (la energía del movimiento), energía potencial (la energía que poseen los campos, como el electromagnético o el gravitatorio) o calor (el movimiento aleatorio y convulso de los átomos y las moléculas). Pero si se hace bien la contabilidad, la primera ley de la termodinámica nos asegura que el balance de energía cuadra[12].

La segunda ley de la termodinámica se centra en la entropía. A diferencia de la primera, esta no es una ley de conservación, sino de crecimiento. La segunda ley declara que con el paso del tiempo se da una tendencia general al aumento de la entropía. En términos coloquiales, las configuraciones especiales tienden a evolucionar hacia configuraciones ordinarias (la camisa que habíamos planchado con tanto esmero acaba arrugada) o el orden tiende a descender hacia el desorden (el garaje que habíamos ordenado degenera en un desbarajuste de cajas, herramientas y trastos de deporte). Aunque esta ilustración es muy visual e intuitiva, la formulación estadística de la entropía de Boltzmann nos permite describir la segunda ley de la termodinámica con precisión y, lo que es igual de importante, entender mucho mejor por qué es cierta.

Todo se reduce a un juego de números. Pensemos otra vez en las monedas. Si las ordenamos de tal manera que todas estén cara arriba, que es una configuración de baja entropía, y luego sacudimos un poco la mesa, esperaremos ver al menos algunas cruces, es decir, una configuración de mayor entropía. Si sacudimos más, cabe la posibilidad de que volvamos a tener solo caras, pero para eso la sacudida tendría que ser muy precisa y particular para darle la vuelta únicamente a aquellas pocas monedas que estaban cara abajo. Y eso es extraordinariamente improbable. Es muchísimo más probable que la sacudida haga saltar y dé la vuelta a unas cuantas monedas al azar. Alguna de esas pocas monedas que estaban cara abajo podría acabar nuevamente cara arriba, pero de las que estaban cara arriba, algunas pasarán a mostrarnos la cruz. Así que una lógica directa, sin necesidad de matemáticas sofisticadas ni ideas innecesariamente abstractas,

nos revela que si comenzamos solo con caras, las sacudidas al azar provocarán un aumento del número de cruces y, por consiguiente, un aumento de la entropía.

La progresión hacia un número mayor de cruces seguirá hasta que más o menos tengamos mitad caras y mitad cruces. En ese momento, las sacudidas tenderán a voltear tantas caras a cruz como cruces a cara, así que las monedas pasarán la mayor parte del tiempo migrando entre los miembros de los grupos más numerosos, los de mayor entropía.

Lo que es cierto para las monedas, lo es también en general. Si horneamos una hogaza de pan, podemos estar seguros de que pronto su aroma alcanzará estancias muy alejadas de la cocina. Al principio, las moléculas que se liberan a medida que se cuece el pan se concentrarán cerca del horno, pero poco a poco se irán dispersando. La razón, parecida a nuestra explicación sobre las monedas, es que hay muchas más maneras de que las moléculas de aroma se dispersen en comparación con las que las mantienen agrupadas. Por consiguiente, es muchísimo más probable que, con sus choques y sacudidas, las moléculas se vayan alejando, y no que se vayan concentrando. La configuración de moléculas agrupadas en torno al horno, que es de baja entropía, evolucionará de manera natural hacia el estado de mayor entropía, en el que están esparcidas por toda la casa[13].

Por decirlo de manera aún más general, si un sistema físico no se encuentra ya en estado de mayor entropía disponible, resulta muy muy probable que evolucione hacia este. La explicación, bien ilustrada por el aroma del pan, tiene una argumentación muy básica: como el número de configuraciones de más entropía es enormemente mayor que el de las configuraciones de menos entropía (por la propia definición de entropía), habrá una probabilidad muchísimo más alta de que las sacudidas al azar (el constante chocar y vibrar de los átomos y las moléculas) empujen al sistema hacia una entropía más alta, no más baja. Así será hasta que se alcance una configuración con la máxima entropía disponible. A partir de ese momento, las sacudidas tenderán a llevar a los constituyentes a migrar entre el número (típicamente) ingente de configuraciones de los estados de mayor entropía[14].

Esta es la segunda ley de la termodinámica. Y esta es la razón de que sea verdadera.

Energía y entropía

La discusión podría llevarnos a pensar que la primera y la segunda ley son absolutamente distintas. Al fin y al cabo, una se centra en la energía y su conservación; la otra, en la entropía y su crecimiento. Sin embargo, existe una conexión profunda entre ambas que subraya un hecho implícito en la segunda ley al que regresaremos a menudo: no toda la energía se crea igual.

Consideremos, a modo de ejemplo, un cartucho de dinamita. Como toda la energía almacenada en la dinamita está contenida en un paquete químico prieto, compacto y ordenado, la energía es fácil de aprovechar. Basta con colocar el cartucho donde queremos depositar su energía y encender la mecha. Eso es todo. Tras la explosión, toda la energía de la dinamita sigue existiendo. Esa es la primera ley en acción. Pero como la energía de la dinamita se ha transformado en el movimiento rápido y caótico de partículas muy dispersas, aprovecharla ahora sería extremadamente difícil. Así pues, aunque la cantidad total de energía no cambia, su calidad sí lo hace.

Antes de la explosión, decimos de la energía de la dinamita que es de alta calidad: está concentrada y es fácil de obtener. Tras esta, decimos que es de baja calidad: está dispersa y es difícil de usar. Y como la detonación obedece a rajatabla la segunda ley, yendo del orden al desorden, o sea, de baja entropía a alta entropía, asociamos la baja entropía con energía de alta calidad, y alta entropía, con la de baja. Lo sé: son muchos altos y bajos para seguir el hilo. Pero la conclusión es sucinta: mientras que la primera ley de la termodinámica declara que la cantidad de energía se conserva en el tiempo, la segunda ley dictamina que la calidad de esa energía se deteriora con el tiempo.

Entonces ¿por qué el futuro es distinto del pasado? La respuesta, evidente a partir de lo que acabamos de explicar, es que la energía que alimenta el futuro es de menor calidad que la que alimentó el pasado. El futuro tiene más entropía que el pasado.

O, al menos, eso es lo que Boltzmann propuso.

Boltzmann y el Big Bang

No cabe duda de que Boltzmann estaba sobre la pista. Pero hay una sutil clarificación de la segunda ley cuyas implicaciones, dicho sea de paso, incluso este físico austríaco tardó en comprender del todo.

La segunda ley no es una ley en el sentido tradicional, pues no prohíbe taxativamente que la entropía se reduzca, sino que declara, simplemente, que la reducción es improbable. En el caso de las monedas, hemos cuantificado esa probabilidad. En comparación con la única configuración que produce solo caras, es cien mil millones de trillones de veces más probable que las tiradas al azar produzcan una configuración con cincuenta caras y cincuenta cruces. Si sacudimos una vez más esa configuración de alta entropía, obtener una configuración de baja entropía (todo caras) no está prohibido, pero como la probabilidad es ínfima, en la práctica no ocurre.

Para un sistema físico ordinario formado por mucho más de un centenar de constituyentes, la probabilidad relativa de que la entropía disminuya se torna mucho más en contra de esa posibilidad. Al cocerse, el pan libera billones y billones de moléculas. Las configuraciones en las que estas se dispersan por toda la casa son espectacularmente más numerosas que aquellas en las que todas vuelven al horno. La agitación y las colisiones entre moléculas «podrían» llevarlas a rehacer su camino de vuelta a la hogaza, a deshacer el proceso de cocción y dejarnos otra vez con la masa cruda. Sin embargo, la probabilidad de que eso ocurra está más cerca de cero incluso que la probabilidad de tirar pintura sobre un lienzo y reproducir *La Gioconda*. Lo importante es entender que si un proceso inverso como el descrito ocurriese, no contravendría las leyes de la física. Aunque sea tremendamente improbable, las leyes de la física permiten que la entropía disminuya.

Pero no nos equivoquemos. No pretendo sugerir que algún día vayamos a ver cómo se descuece una hogaza o descolisiona un coche o un documento quemado se recompone solo. Lo que pretendo es hacer hincapié en una cuestión de principio importante. He explicado antes que las leyes de la física ponen el pasado y el futuro a un mismo nivel, garantizan que los procesos físicos que se desarrollan en una secuencia temporal pueden desarrollarse también en la secuencia inversa. Y como esas mismas leyes lo rigen todo, incluso los procesos físicos responsables de los cambios de entropía con el paso del tiempo, sería sin duda curioso, erróneo de hecho, descubrir que esas leyes solo permiten que la entropía aumente. No lo hacen. Todos los procesos que aumentan la entropía y que experimentamos día tras día durante toda la vida, desde lo más mundano, como romper una copa, a lo más profundo,

como el envejecimiento del cuerpo, pueden ocurrir al revés. La entropía puede disminuir. Lo que pasa es que es ridículamente improbable.

Entonces ¿dónde queda nuestra misión de explicar por qué el futuro es distinto del pasado? Pues en que dada una configuración actual con entropía menor que la máxima, la segunda ley nos indica que es extraordinariamente probable que el futuro sea distinto, porque la entropía tiene una probabilidad extraordinariamente alta de aumentar. Las configuraciones de la materia que tienen una entropía inferior a la máxima están ansiosas por moverse hacia una entropía mayor. Con esta observación, algunos de los que exploran la diferencia entre pasado y futuro se quedarán tranquilos, seguros de que su trabajo ya ha terminado.

Pero no es así. Y lo que es más importante, aún tenemos que explicar por qué hoy nos encontramos en un estado tan especial, improbable y sorprendente de entropía inferior que la máxima, en un universo repleto de estructuras ordenadas, desde los planetas y las estrellas hasta los pavos reales y nosotros mismos. Si fuera así, si la configuración actual fuese la esperada, ordinaria y nada sorprendente del estado de máxima entropía, entonces con enorme probabilidad el universo seguiría habitando ese estado, produciendo un futuro igual al pasado. Como una bolsa de monedas que, agitadas, transitan por el ingente número de configuraciones que producen más o menos cincuenta caras y cincuenta cruces, el universo vagaría de manera inexorable por el enorme paisaje de sus configuraciones de máxima entropía: partículas ampliamente dispersas moviéndose por el espacio en una y otra dirección en una suerte de versión cósmica del vapor de agua que ocupa de manera uniforme un cuarto de baño[15]. El actual estado de entropía inferior a la máxima es, por suerte para nosotros, muchísimo más interesante, pues nos ofrece la oportunidad de que las partículas se reúnan formando estructuras y se produzcan cambios macroscópicos. Y eso nos lleva a preguntarnos cómo hemos llegado a este estado de entropía inferior a la máxima.

Si seguimos al pie de la letra la segunda ley, debemos concluir que el estado de hoy se deriva del de ayer, cuya entropía debía ser algo menor. Y ese estado cabe imaginar que se derive a su vez del estado de anteayer, de entropía aún menor, y así sucesivamente, siguiendo un rastro de entropía cada vez menor que nos lleva cada vez más lejos por el pasado hasta llegar al Big Bang. El punto de partida altamente ordenado en el momento de la Gran Explosión, con una entropía espectacularmente baja, es lo que explica que el universo actual no posea la máxima entropía y permita un futuro lleno de sucesos distintos del pasado.

¿Podemos ir más allá y explicar por qué el origen del universo estaba tan ordenado? Volveremos a esta pregunta en el próximo capítulo, cuando exploremos teorías cosmológicas. Por el momento, basta con señalar que nuestra supervivencia requiere orden, desde nuestra organización molecular interna, que sustenta una gran variedad de funciones esenciales para la vida, hasta las fuentes de alimento que nos proveen de energía de alta calidad, o las herramientas y hábitats esenciales para nuestra existencia. Sin un entorno repleto de estructuras ordenadas, es decir, de baja entropía, los humanos no estaríamos aquí para observarlo.

Calor y energía

Comencé este capítulo con Bertrand Russell, que se lamentaba de un universo sometido a un inexorable decaimiento. Al conocer el enunciado de la segunda ley sobre el aumento de la entropía, hemos podido vislumbrar lo que inspiró su negra profecía. Podemos comprenderla al momento si pensamos en el aumento de la entropía como un incremento del desorden. Pero para entender de verdad los retos que en el futuro encararán la vida, la mente y la materia, que es lo que exploraremos a fondo en los siguientes capítulos, necesitamos establecer un vínculo entre la moderna descripción de la segunda ley de la termodinámica, tal como la hemos presentado, y la formulación original desarrollada a mediados del siglo XIX. En aquella primera versión, la segunda ley codificaba lo que resultaba obvio para cualquiera que trabajase con máquinas de vapor: el proceso de quemar combustible para accionar una máquina siempre produce calor y residuos: degradación. Sin embargo, como esa primera versión no mencionaba el recuento de configuraciones de partículas y no hacía uso de argumentaciones probabilísticas, podría parecernos muy alejada del enunciado estadístico sobre el crecimiento de la entropía que acabamos de desarrollar. Pero hay una conexión profunda y directa entre las dos formulaciones que revela por qué la conversión de energía de alta calidad en otra de baja calidad en la máquina de vapor ilustra la degradación ubicua que tiene lugar en todo el cosmos.

Explicaré el vínculo en dos pasos. Primero, examinaremos la relación entre entropía y calor. Luego, en la siguiente sección, enlazaremos el calor con el enunciado estadístico de la segunda ley.

Si asimos el mango caliente de una sartén, nos parece sentir que fluye calor hacia la mano. Pero ¿realmente es así? Hace mucho tiempo, los científicos creían que sí, y concebían una sustancia parecida a un fluido, a la que llamaban «calórico», que debía fluir de los lugares más calientes a los más fríos, del mismo modo que un río discurre de los lugares más altos a los más bajos. Con el tiempo, un mejor conocimiento de los ingredientes de la materia proporcionó una descripción distinta. Cuando asimos el mango de la sartén, sus moléculas, en rápido movimiento, colisionan con las moléculas más lentas de la mano, y provocan que aumente la velocidad promedio de las moléculas de la mano al tiempo que disminuye la velocidad de las moléculas del mango. Ese aumento de la velocidad de nuestras moléculas es lo que percibimos como calor, y podemos medir un aumento de la temperatura de la mano. Al mismo tiempo, la menor velocidad de las moléculas del mango implica que su temperatura ha bajado. Lo que fluye, pues, no es una sustancia. Las moléculas del mango siguen estando en el mango, y las de la mano, en la mano. Lo que ocurre es que, del mismo modo que la información fluye de una persona a la siguiente en el juego del teléfono, cuando asimos la sartén, la agitación molecular fluye de las moléculas del mango a las de la mano. Así pues, aunque la propia materia no fluye de la sartén a nosotros, una cualidad de la materia (la velocidad media) sí lo hace. A eso nos referimos cuando hablamos de flujo de calor.

La misma descripción se aplica también a la entropía. A medida que aumenta la temperatura de la mano, sus moléculas rebotan de un lado para otro más deprisa, y se abre el abanico de velocidades posibles, lo que implica que aumenta el número de configuraciones posibles que producen más o menos lo mismo; por consiguiente, la entropía de la mano aumenta. Al propio tiempo, dado que la temperatura del mango desciende, sus moléculas se mueven más despacio, el abanico de velocidades posibles se torna más estrecho, se reduce el número de configuraciones posibles que dan un resultado parecido, y, en definitiva, la entropía del mango se reduce.

Un momento. ¿La entropía se «reduce»?

Sí. Pero eso no tiene nada que ver con improbables chiripas estadísticas como la de hacer una tirada de monedas y que salgan todas cara, como en el ejemplo de la sección anterior. La entropía del mango caliente se reducirá cada vez que lo agarremos. La cuestión, simple pero esencial, que ilustra la sartén es que lo que dicta la segunda ley de la termodinámica sobre el aumento de la entropía hace referencia a la entropía «total» de un sistema físico completo, que necesariamente incluye todo aquello con lo que

interacciona el sistema. Como nuestra mano interacciona con el mango de la sartén, no podemos aplicar la segunda ley solamente al mango, sino que debemos incluir tanto el mango como la mano (y, para ser más precisos, la sartén entera, el horno, el aire del entorno, etc.). Un balance meticuloso mostraría entonces que el aumento de entropía de la mano es superior a la reducción de la entropía del mango, de modo que la entropía total, como cabe esperar, aumenta.

Así pues, como pasaba con el calor, en cierto sentido, la entropía puede fluir. En el caso de la sartén, fluye del mango a la mano. El mango queda un poco más ordenado y la mano un poco menos ordenada. Hay que insistir en que el flujo no es de una sustancia tangible que al principio esté en el mango y se desplace hacia la mano, sino que el flujo de entropía denota una interacción entre las moléculas del mango y las de la mano que afecta a las propiedades de ambos. En este caso, modifica las velocidades medias (y, por tanto, las temperaturas) y eso, a su vez, afecta a la entropía de cada uno.

Como esta explicación deja entrever, el flujo de calor y el de entropía están íntimamente vinculados. Absorber calor es absorber energía en forma de movimiento molecular aleatorio. Esa energía, a su vez, hace que las moléculas que la reciben se muevan más deprisa o se dispersen más lejos, contribuyendo de este modo a un aumento de la entropía. Por tanto, la conclusión es que para llevar entropía de aquí para allá tiene que fluir calor de aquí para allá. Y cuando el calor fluye de aquí para allá, la entropía se mueve de aquí para allá. En pocas palabras, la entropía navega sobre la ola del flujo de calor.

Ahora que comprendemos mejor la relación entre calor y entropía, volvamos a examinar la segunda ley.

El calor y la segunda ley de la termodinámica

Explicar por qué la experiencia nos muestra que los sucesos se producen en una dirección pero no en la contraria nos ha llevado hasta Boltzmann y su versión estadística de la segunda ley: la entropía tiene una probabilidad abrumadoramente alta de aumentar hacia el futuro, de lo que se deduce que las secuencias inversas (en las que la entropía se reduciría) son fantásticamente improbables. Pero ¿cómo se relaciona esto con la anterior

formulación de la segunda ley, inspirada por la máquina de vapor, que enunciábamos en términos de la inexorable producción de calor residual en los sistemas físicos?

La conexión es que los dos puntos de partida (reversibilidad y máquinas de vapor) están enlazados de manera estrecha. La razón es que este ingenio se basa en un proceso cíclico: la expansión del vapor empuja un pistón que luego es devuelto a su posición original, donde espera el siguiente empujón. El vapor también retorna a su volumen, presión y temperatura originales, igual que el resto de las piezas esenciales de la máquina, que queda así dispuesta para calentarse de nuevo y volver a empujar el pistón. Aunque nada de esto requiere el ridículamente improbable proceso que llevaría a cada molécula a rehacer su camino hasta ocupar con precisión el mismo lugar o adquirir la velocidad exacta que tenía al principio del ciclo, sí implica que la disposición general (el macroestado de la máquina) retorne a la misma forma para iniciar cada nuevo ciclo.

¿Qué significa todo eso para la entropía? Pues que como esta es una medida de las configuraciones microscópicas que se manifiestan como el mismo macroestado, si al principio de cada ciclo se restablece el macroestado de la máquina de vapor, también debe restablecerse la entropía. Eso significa que la entropía que este invento adquiere durante cada ciclo (al absorber calor de la quema del combustible, al generar calor mediante la fricción de sus piezas móviles, etc.) debe haberse expulsado al medio en el momento en que el ciclo concluye. ¿Cómo hace eso la máquina de vapor? Ya hemos visto que para transferir entropía hay que transferir calor. Por consiguiente, para restablecerse para el siguiente ciclo, este aparato «tiene que liberar calor hacia el entorno». Ese es el enunciado histórico de la segunda ley de la termodinámica, la inevitable expulsión de calor hacia el medio, la degradación que tanto había pesado a Bertrand Russell y que ahora derivamos a partir de la versión estadística de la segunda ley[16].

Aquí es donde quería llegar, así que el lector puede, si así lo desea, saltar directamente a la siguiente sección. Pero si tiene algo de paciencia, hay un detalle que no podemos pasar por alto. Si la máquina de vapor absorbe calor de la quema del combustible (y, por tanto, absorbe entropía) solo para liberar calor al entorno (liberando entropía), ¿cómo le queda energía para realizar trabajo útil, como empujar una locomotora? La respuesta es que este ingenio libera menos calor que el que absorbe, y aún así puede purgar totalmente la entropía que acumula. Veamos cómo lo consigue.

La máquina de vapor absorbe calor y entropía del combustible y libera calor y entropía al entorno, que está más frío. La diferencia de temperatura entre el combustible que se quema y el entorno es lo importante. Para verlo, imaginemos que encendemos dos estufas idénticas: una en una habitación que está helada y otra en una habitación que está caliente. En la primera, la estufa agita las frías moléculas del aire, lo que hace que se muevan más deprisa y se dispersen más lejos, así que la entropía aumenta de manera notable. En la habitación caliente, las moléculas del aire ya se están moviendo deprisa, yendo de un lado para otro, de modo que la estufa solo aumenta ligeramente su entropía. (Es un poco como poner música de ritmo un poco más frenético en una fiesta salvaje de Nochevieja y notar que la gente baila apenas un poquito más rápido, mientras que si ponemos música más marchosa en el monasterio de Thiksey, incitando a los monjes a abandonar su práctica de la meditación para empezar a bailar como locos, veríamos un cambio muy claro). Así pues, aunque las dos estufas son idénticas, la entropía que transfieren a su entorno es distinta: a pesar de que las dos generan la misma cantidad de calor, la de la estancia más fría transfiere más entropía. Así pues, una cantidad dada de calor recibido produce un mayor aumento de entropía en un entorno más frío. A la vista de esto, podemos entender que la máquina de vapor pueda deshacerse de toda la entropía que adquiere del combustible caliente expulsando tan solo parte del calor al entorno más frío. El resto del calor queda disponible entonces para que el vapor se expanda y empuje el pistón, realizando así un trabajo útil.

Esta es la explicación, pero conviene que los detalles no oscurezcan la conclusión importante: con el paso del tiempo, los sistemas físicos evolucionan con una probabilidad abrumadoramente alta de configuraciones de baja entropía a configuraciones de mayor entropía. Si un sistema, como la máquina de vapor, busca mantener su integridad estructural, tiene que evitar la tendencia natural al aumento de la entropía, transfiriendo la entropía que acumula hacia el entorno. Para hacerlo, la máquina debe liberar calor residual hacia el medio.

El paso a dos de la entropía

Si pensamos con atención en los pasos que hemos seguido, veremos que, si bien hemos estado hablando aquí y allá de la máquina de vapor, nuestras conclusiones trascienden este punto de partida del siglo XVIII. Lo esencial de nuestro análisis es un balance meticuloso de la entropía, y ese balance puede hacerse en cualquier contexto. Esto es importante comprenderlo, porque el trasiego de entropía de la máquina de vapor a su entorno mediante la liberación de calor no es más que una versión de un proceso absolutamente general con el que nos encontraremos constantemente mientras examinamos la evolución del cosmos. Yo lo llamo el «paso a dos de la entropía», con lo que me refiero a todo proceso por el cual la entropía de un sistema disminuye porque se transfiere al entorno una cantidad algo mayor de entropía. Los dos pasos permiten que por mucho que disminuya la entropía en un lugar, suba en otro y se garantice así el aumento neto de entropía que esperamos de acuerdo con la segunda ley.

El paso a dos de la entropía también explica que un universo abocado a un desorden cada vez mayor pueda, sin embargo, producir y sustentar estructuras ordenadas como estrellas, planetas y seres humanos. Un tema con el que nos encontraremos repetidamente es que cuando la energía fluye a través de un sistema (como la energía de la combustión de carbón que fluye por el vapor, hace trabajo y luego sale hacia el entorno), se lleva consigo entropía y, de este modo, puede mantener e incluso producir orden a su paso.

Es esta danza entrópica la que marcará la coreografía del origen de la vida y la mente, y de todo lo que las mentes consideren importante.

Somos máquinas de vapor

Dada la importancia de restablecer la entropía cada vez que una máquina de vapor reinicia su ciclo, cabe preguntarse qué pasaría si ese restablecimiento de la entropía fallase. Eso equivale a imaginar que este artefacto no consigue expulsar el calor residual adecuado: con cada ciclo estaría más caliente, hasta sobrecalentarse y romperse. Si eso le pasase a una máquina de vapor, sería una inconveniencia pero, suponiendo que no hubiese heridos, no llevaría a nadie a una crisis existencial. Sin embargo, la misma física ocupa un papel central en que la vida y la mente puedan persistir de manera indefinida en el

futuro lejano. Y es que lo que sirve para este aparato industrial, sirve también para cada uno de nosotros.

Nadie se ve a sí mismo como una máquina de vapor, ni como un mecanismo físico. Ni siquiera yo me describo en esos términos. Pero pensemos en ello: nuestra vida implica procesos que no son menos cíclicos que los de un motor de combustión. Día tras día, nuestro cuerpo quema los alimentos que ingerimos y el aire que respiramos con el fin de proveernos de energía para el funcionamiento de los órganos internos y para las actividades externas que realizamos. Incluso el propio acto de pensar (movimientos moleculares en el cerebro) se alimenta a través de esos procesos de conversión de energía. Así pues, igual que una máquina de vapor, no podríamos sobrevivir sin restablecer la entropía purgando hacia el medio el calor residual. Y eso es justamente lo que hacemos. Todos. Todo el tiempo. Esa es la razón, por ejemplo, de que las gafas militares de infrarrojos diseñadas para «ver» el calor que todos expelimos continuamente ayuden a los soldados a localizar al enemigo por la noche.

Ahora podemos valorar más justamente el marco mental de Russell cuando imaginaba el futuro lejano. Todos libramos una batalla inexorable para resistir a la persistente acumulación de residuos, al imparable aumento de la entropía. Para que nosotros sobrevivamos, el entorno tiene que absorber y llevarse todo el residuo, toda la entropía que generamos. Y eso plantea una pregunta: ¿proporciona el entorno (y con ello nos referimos ahora al universo entero) un pozo sin fondo para absorber todos esos residuos? ¿Puede la vida bailar el paso a dos de la entropía de manera indefinida? ¿O llegará un tiempo en que el universo quede saturado y no pueda ya absorber el calor residual generado por las mismísimas actividades que nos definen, poniendo punto final a la vida y la mente? En la atribulada manera en que lo expresa Russell, ¿es verdad que «todos los esfuerzos de todos los tiempos, toda la devoción, toda la inspiración, todo el brillo del mediodía del genio humano, están destinados a extinguirse en la vasta muerte del sistema solar, y el templo entero de los logros del hombre quedará inevitablemente sepultado bajo los escombros de un universo en ruinas»?[17].

Estas son algunas de las preguntas centrales que exploraremos en los siguientes capítulos. Pero nos hemos adelantado un poco. Antes de pasar a hablar de la vida y la mente, tenemos que entender qué papel desempeñan la entropía y la segunda ley en la formación de los entornos necesarios para que estas dos tengan lugar.

Y para eso tenemos que retroceder hasta el Big Bang.

3

ORÍGENES Y ENTROPÍA

De la creación a la estructura

En el momento en que la matemática permite a los científicos vislumbrar lo que ocurrió durante la primera fracción de segundo después de lo que bien podría haber sido el principio del universo, la cercanía a un ámbito tradicionalmente religioso lleva a algunos a pensar que existe una profunda alianza, una profunda conexión o un profundo conflicto que pugna por ser revelado. Por eso se me pregunta acerca de mis opiniones sobre un creador casi tan a menudo como sobre la ciencia. De hecho, las cuestiones suelen extenderse sobre las dos vertientes. Ya tendremos ocasión de explayarnos sobre este debate en capítulos posteriores; aquí vamos a explorar un punto de contacto que dejamos planteado al final del capítulo anterior y que es esencial para nuestro relato: si la segunda ley de la termodinámica impone al universo la pesada carga de un imparable aumento de desorden, ¿cómo consigue la naturaleza producir sin problema alguno estructuras tan exquisitamente configuradas y ordenadas como los átomos y las moléculas, las estrellas y galaxias, o la vida y la mente? Si el universo comenzó con una explosión, ¿cómo pudo ese estallido dar origen a toda la organización, desde los brazos en espiral de la Vía Láctea hasta los espectaculares paisajes de la Tierra, las intrincadas conexiones y circunvoluciones del cerebro humano, o el arte, la música, la poesía, la literatura y la ciencia que esos cerebros producen?

Una respuesta repetida a lo largo de los tiempos para responder a versiones embrionarias de esas preocupaciones es que el orden fue labrado en el caos por una inteligencia suprema. La experiencia humana cuadra con esta proposición de inspiración antropomórfica. Al fin y al cabo, buena parte del orden con el que nos encontramos día a día en la civilización humana es

producto de la inteligencia. Pero una buena exégesis de la segunda ley nos lleva a entender que un diseñador inteligente es innecesario. Por sorprendente y notorio que parezca, las regiones donde se concentran energía y orden (las estrellas son el ejemplo arquetípico) son consecuencia natural de un universo que obedece la segunda ley y se torna cada vez más «desordenado». De hecho, esas bolsas de orden resultan ser catalizadores que facilitan que, a largo plazo, el universo alcance su potencial entrópico. De paso, y como parte de esta progresión entrópica, facilitan también que surja la vida.

Para explorar la danza del orden y el desorden que se representa a lo largo de toda la historia cosmológica, comencemos por el principio.

Un bosquejo del Big Bang

A mediados de la década de 1920, el sacerdote jesuita Georges Lemaître utilizó la recién publicada descripción de la gravedad de Einstein (la teoría general de la relatividad) para desarrollar la idea radical de un cosmos que comenzó con una explosión y no ha parado de expandirse desde entonces. Lemaître no era ningún científico de salón. Se había doctorado en el Instituto de Tecnología de Massachusetts y fue uno de los primeros científicos que aplicó las ecuaciones de la relatividad general al conjunto del cosmos. La intuición de Einstein, que le había servido de excelente guía durante una magnífica década de descubrimientos sobre la naturaleza del espacio, el tiempo y la materia, fue comprender que los objetos que hay «en» el universo tienen un principio, un medio y un final, mientras que el universo en sí siempre ha sido y siempre será. Cuando el análisis de Lemaître a partir de las ecuaciones de Einstein sugirieron lo contrario, el físico alemán se sacó de encima sin más al joven investigador, diciéndole: «Sus cálculos son correctos, pero su física es abominable»[1]. Lo que Einstein quería decir es que uno puede ser muy ducho en la manipulación de las ecuaciones y sin embargo carecer de un olfato científico lo bastante fino como para decidir cuáles de esas manipulaciones matemáticas reflejan la realidad.

Varios años más tarde, Einstein protagonizó uno de los cambios de opinión más célebres de la ciencia de todos los tiempos. Las meticulosas observaciones astronómicas de Edwin Hubble desde el observatorio de Mount Wilson revelaron que todas las galaxias lejanas se estaban desplazando. Se

escapaban. Además, el patrón de su éxodo (cuanto más lejana la galaxia, mayor su velocidad) concordaba con los resultados matemáticos de las ecuaciones de la relatividad general. Ahora que los datos respaldaban la abominable física de Lemaître, Einstein hubo de aceptar incondicionalmente la idea de que el universo tuvo un principio[2].

Durante el siglo que ha transcurrido desde los innovadores cálculos de Lemaître, las teorías que él inició, junto con indagaciones independientes del físico ruso Aleksandr Fridman, se han desarrollado de manera sustancial al mismo tiempo que se acumulaba una gran cantidad de indicios a partir de observaciones realizadas mediante telescopios terrestres y espaciales. El relato cosmológico que ha surgido de todo ello es el siguiente. Hace unos catorce mil millones de años, todo el universo observable (todo lo que podemos ver con los telescopios más potentes que podamos imaginar) se hallaba comprimido en un punto fabulosamente caliente e increíblemente denso que luego se expandió con gran rapidez. Al expandirse, se fue enfriando, y poco a poco las partículas apaciguaron su enloquecido movimiento y se agregaron en grumos que, con el tiempo, dieron lugar a estrellas, planetas y toda suerte de restos gaseosos y rocosos dispersos por el espacio. Y también a nosotros.

En dos frases, esa es la historia. Pero podemos refinarla. En lo que sigue vamos a entender cómo, sin intención ni diseño, sin premeditación ni juicio, sin planificación ni deliberación, el cosmos produce configuraciones meticulosamente ordenadas de partículas, de los átomos a las estrellas y a la propia vida. Vamos a comprender que la aparición de esas estructuras ordenadas no viola en absoluto los decretos de la segunda ley sobre el inexorable aumento del desorden. Vamos a presenciar el paso a dos de la entropía sobre el escenario cósmico.

Para ello, necesitaremos comprender varios detalles de la cosmología. Para empezar, ¿que empujó a aquel punto primordial a expandirse? O, en un lenguaje más coloquial, ¿qué prendió la mecha del Big Bang?

Gravedad repulsiva

Abundan los antónimos porque la experiencia está repleta de opuestos. Tampoco faltan en la física: orden y desorden, materia y antimateria, positivo

y negativo. Pero desde los tiempos de Newton, la fuerza de la gravedad no parecía compartir esta pauta. A diferencia de la fuerza electromagnética, que puede atraer o repeler, la gravedad parecía ser solamente una fuerza de atracción. Para Newton, la gravedad ejercía un tirón entre objetos, ya fuesen partículas o planetas, que los llevaba a acercarse, pero nunca al revés. A falta de un principio que exigiese simetría en todo el funcionamiento de la naturaleza, la mayoría de quienes reflexionaron a fondo sobre la gravedad vieron este rasgo (la actuación en un solo sentido) como una cualidad intrínseca que simplemente había que aceptar. Einstein cambió todo eso. En la teoría general de la relatividad, la fuerza gravitatoria «puede» ser repulsiva. Newton no concibió una gravedad repulsiva, y nadie la ha experimentado. Pero la gravedad repulsiva hace justamente lo que su nombre sugiere. En lugar de tirar hacia dentro, empuja hacia fuera. De acuerdo con las ecuaciones de Einstein, los objetos masivos como las estrellas y los planetas ejercen la versión usual de la gravedad atractiva, pero hay situaciones extrañas en las que la fuerza gravitatoria puede empujar las cosas a separarse.

Aunque la capacidad repulsiva de la fuerza gravitatoria ya la conocían Einstein y otros científicos posteriores que trabajaron en la teoría general de la relatividad, su aplicación más profunda todavía tardó medio siglo más en descubrirse. Mientras era un joven investigador posdoctoral que estudiaba el Big Bang, Alan Guth se percató de que la gravedad repulsiva podía servir para abordar un confuso enigma cósmico. Las observaciones revelaban que el espacio se estaba expandiendo. Las ecuaciones de Einstein también nos lo decían. Pero esas mismas ecuaciones se mantenían mudas acerca de qué fuerza había puesto en marcha esa expansión hace miles de millones de años. Los meticulosos análisis matemáticos de Guth, que culminaron en una larga noche de cálculos frenéticos en diciembre de 1979, consiguieron que las ecuaciones hablasen.

Guth comprendió que si una región del espacio estaba llena de un tipo particular de sustancia, lo que a mí me gusta llamar «combustible cósmico», y si la energía contenida en ese combustible cósmico se distribuía de manera uniforme por toda la región (en lugar de hallarse concentrada en grumos, como las estrellas o los planetas), entonces la fuerza gravitatoria resultante sería repulsiva. Para ser más precisos, los cálculos de Guth revelaron que si una región diminuta del espacio, de hasta una mil billonésima de billonésima de metro, estuviese ocupada por cierto tipo de campo energético (llamado «campo del inflatón», por una caprichosa pero deliberada alteración de «inflación»), y si la energía estuviese distribuida de manera uniforme (como

vapor con la misma densidad en toda una sauna), el empuje gravitatorio repulsivo sería tan potente que esa mota de espacio se inflaría de forma explosiva, expandiéndose casi de manera instantánea hasta el tamaño del universo actual, o incluso mucho más. De ser así, la gravedad repulsiva habría desencadenado una explosión. O más bien una gran explosión: un Big Bang[3].

A principios de la década de 1980, el físico soviético Andréi Linde y el dúo norteamericano formado por Paul Steinhardt y Andreas Albrecht tomaron el relevo que les pasó Guth y corrieron con el concepto, desarrollando las primeras versiones plenamente viables de la «cosmología inflacionaria». En las décadas que han pasado desde entonces, aquellas primeras indagaciones han inspirado miles de páginas de enrevesados cálculos matemáticos y un buen número de minuciosas simulaciones numéricas que han abarrotado las revistas especializadas de todo el mundo con explicaciones y predicciones basadas en la suposición de un pasado inflacionario. Al final, muchas de esas hipótesis se han confirmado con la ayuda de muy trabajosas mediciones astronómicas. No voy a ofrecer una vista completa del trabajo empírico que sustenta la cosmología inflacionaria, que ya se ha explicado largamente en numerosos libros y artículos, pero sí describiré un éxito que para muchos físicos es el más persuasivo, y que es además lo que necesitamos para el siguiente paso en la evolución del cosmos: la formación de estrellas y galaxias.

El resplandor de la creación

A medida que el universo primigenio se expandía con gran rapidez, su calor abrasador se extendía sobre un espacio cada vez más extenso, de manera que reducía su densidad y se enfriaba gradualmente[4]. Ya en la década de 1940, mucho antes de que se desarrollase la teoría inflacionaria, los físicos comprendieron que aquel calor primordial, reducido por la expansión del espacio a un débil resplandor, debía encontrarse todavía por todo el universo. Este notable residuo cosmológico, que dio en llamarse «resplandor de la creación» o, en el argot técnico, «radiación cósmica de fondo de microondas», fue detectado por primera vez en la década de 1960 por dos investigadores de Bell Labs, Arno Penzias y Robert Wilson, cuya avanzada

antena de telecomunicaciones sirvió por accidente como receptor de una difusa radiación que se extendía por todo el espacio, apenas 2,7 grados por encima del cero absoluto. De hecho, cualquiera que en aquellos años tuviera un televisor también la habría detectado: la nieve estática que aparecía en la pantalla al acabar la emisión se debía en parte a este vestigio del Big Bang.

La cosmología inflacionaria refina la predicción de un resplandor porque toma en consideración la mecánica cuántica, el conjunto de leyes desarrolladas a principios del siglo XX para describir los procesos físicos que tienen lugar en el micromundo. Como estamos hablando del universo entero, de algo enorme, puede parecer que la preocupación de la física cuántica por las cosas pequeñas la torna irrelevante. Y de no ser por la cosmología inflacionaria, esa intuición no sería incorrecta. Pero del mismo modo que cuando se estira un trozo de licra se revela el intrincado patrón del tejido, cuando el estallido de expansión inflacionaria estira el espacio, se ponen de manifiesto características cuánticas que por lo general quedan restringidas al micromundo. En esencia, la expansión inflacionaria alcanza al micromundo y estira las características cuánticas por todo el firmamento.

El efecto cuántico de mayor relevancia es el mismo que de manera irrefutable nos llevó a romper con la tradición clásica: el «principio de incertidumbre de la mecánica cuántica». Descubierto en 1927 por el físico alemán Werner Heisenberg, el principio de incertidumbre (o de indeterminación) demostró que hay características del mundo, como la posición y velocidad de una partícula, que un físico clásico, forjado a imagen de Isaac Newton, afirmaría de manera rotunda que se pueden especificar con absoluta certeza, pero que un físico cuántico reconoce que están sometidas a una indeterminación cuántica que las torna inciertas. Es como si la tradición clásica mirase el mundo a través de unas gafas prístinas y bien pulidas que permiten enfocar todas las características físicas con perfecta definición, mientras que las gafas propias de la perspectiva cuántica son inherentemente borrosas. En el mundo cotidiano y macroscópico de la experiencia común, la neblina cuántica es demasiado tenue como para afectar a la visión, así que las perspectivas clásica y cuántica son prácticamente indistinguibles. Pero cuanto más pequeño es el espacio que se examina, más se empañan las lentes cuánticas y más borrosa es la imagen que nos ofrecen.

La metáfora podría llevarnos a pensar que basta con limpiar las lentes cuánticas. Pero el principio de incertidumbre establece que, por muy meticulosos que seamos y por avanzados que sean nuestros instrumentos, siempre quedará una mínima cantidad de turbidez que no hay manera de

limpiar. De hecho, la forma en que lo he expresado deja entrever el sesgo de la experiencia humana. La realidad cuántica solo «parece» borrosa en comparación con la visión clásica, la que los humanos descubrimos primero porque es más simple y extraordinariamente precisa a las escalas accesibles a nuestros sentidos, pero que se puede demostrar incorrecta. En realidad, es la perspectiva clásica la que proporciona una visión aproximada, y por tanto imprecisa, de la verdadera realidad cuántica.

No sé por qué la realidad está gobernada por leyes cuánticas. Nadie lo sabe. Un siglo de experimentos ha permitido confirmar multitud de predicciones de la mecánica cuántica, y por eso los científicos aceptan la teoría. Aun así, para la mayoría de nosotros la mecánica cuántica sigue siendo extraña en su totalidad, porque sus principales características emergen a distancias tan pequeñas que, sencillamente, no las experimentamos en nuestra vida diaria. Si lo hiciésemos, nuestra intuición común habría sido moldeada de manera directa por procesos cuánticos y la física cuántica sería de lo más normal. Del mismo modo que conocemos las implicaciones de la física newtoniana en nuestra propia carne (podemos agarrar al vuelo un vaso que cae porque intuimos al instante su trayectoria newtoniana), también conoceríamos en nuestra propia carne la física cuántica. A falta de intuición cuántica, tenemos que recurrir a las matemáticas y los experimentos para moldear nuestro entendimiento con representaciones de aspectos de la realidad que no podemos percibir de manera directa.

El ejemplo más estudiado, que ya hemos mencionado, concierne al comportamiento de las partículas, y lo que aprendemos es que debemos modificar las trayectorias bien definidas inherentes a la física clásica considerando la agitación incesante de la incertidumbre cuántica. Si para dibujar la trayectoria de una partícula de un lugar a otro un físico clásico usaría una pluma de trazo muy fino, un físico cuántico utilizaría su propio dedo mojado en tinta[5]. Pero la mecánica cuántica es relevante más allá del movimiento de partículas individuales y, en lo que atañe a la cosmología, el principio de incertidumbre cuántica ejerce una influencia decisiva sobre el inflatón que alimenta la rápida expansión del espacio. Aunque he descrito el valor del inflatón como si fuese uniforme, igual en todos los puntos de una región del espacio durante la inflación, en realidad la incertidumbre cuántica hace que sea algo más borroso. La incertidumbre superpone la agitación cuántica a la uniformidad clásica, y el resultado es que el valor del campo, y por tanto su energía, es un poquito más alto aquí y un poquito más bajo allá.

Cuando la expansión inflacionaria estira rápidamente estas minúsculas variaciones de energía cuántica, se esparcen por el espacio haciendo que la temperatura sea un poco más caliente aquí y un poco más fría allá. Muy poco más. Los análisis matemáticos que empezaron a hacer los físicos en la década de 1980 demostraron que las temperaturas de los puntos más calientes y más fríos podían diferir en apenas una fracción de una centésima de milésima de grado. Pero los análisis matemáticos indicaron además que esas minúsculas variaciones de temperatura podían llegar a verse si uno sabía dónde buscarlas. Sus cálculos revelaron que las agitaciones cuánticas así estiradas producen un patrón característico de variaciones de temperatura por el espacio, una huella cosmológica que pueden buscar los forenses de la astronomía. Y, en efecto, desde principios de la década de 1990, una serie de telescopios situados por encima de las distorsiones causadas por la atmósfera terrestre confirmaron con precisión cada vez mayor las predicciones sobre el patrón de variaciones de temperatura.

Tomemos un momento para digerir todo esto. Los físicos describen los primeros momentos del universo usando las ecuaciones de Einstein, actualizadas para incluir el campo de energía que llena el universo según la hipótesis de Guth, y sujetas a la incertidumbre cuántica que aprendimos de Heisenberg. Luego, los análisis matemáticos del estallido inflacionario nos revelan que debería haber dejado una huella indeleble, un fósil de la creación en forma de un patrón específico de minúsculas variaciones de temperatura a lo largo y ancho del firmamento. Unos sofisticados termómetros espaciales construidos casi catorce mil años después aquí, en la Vía Láctea, por una especie que apenas ha alcanzado la mayoría de edad científica, detectan justamente ese patrón.

Es un éxito espectacular que demuestra una vez más la insólita capacidad de las matemáticas para aprehender y sintetizar los patrones de la naturaleza. Pero concluir que las observaciones demuestran que se produjo un estallido de expansión inflacionaria sería ir demasiado lejos. Cuando examinamos acontecimientos cosmológicos que ocurrieron hace miles de millones de años, a una escala de energía probablemente trillones de veces superior a la que podemos experimentar en los laboratorios, lo máximo que podemos hacer es reunir observaciones y cálculos para reforzar la confianza en nuestras explicaciones. Si un estallido inflacionario fuese la única manera de entender los datos cosmológicos, nuestra confianza se acercaría a la certidumbre, pero a lo largo de los años no han faltado científicos imaginativos que han desarrollado enfoques alternativos (veremos uno de ellos en el capítulo 10).

Dicho esto, mi opinión, que comparten muchos científicos, es que si bien debemos mantenernos abiertos a nuevas ideas que desafíen las perspectivas dominantes, la evidencia a favor de la cosmología inflacionaria desarrollada a lo largo de los últimos cuarenta años es formidable[6]. Y por eso en lo que nos queda de viaje seguiremos, en su mayor parte, el rastro inflacionario.

Llegados a esta conclusión, veamos ahora cómo se relaciona un origen inflacionario con la tendencia que impone la segunda ley hacia un mayor desorden.

El Big Bang *y la segunda ley*

Pese a siglos de progreso científico, no nos encontramos más cerca de responder a la pregunta que planteó Gottfried Leibniz (¿Por qué hay algo en lugar de nada?) de lo que estábamos cuando el filósofo alemán formuló esta escueta síntesis del misterio de la existencia. Y no es por falta de ideas creativas y teorías provocadoras. Pero al preguntarnos sobre el origen último, buscamos una respuesta que no requiera antecedente, que no desplace la pregunta un paso más atrás, que no suscite cuestiones como «¿por qué fueron las cosas *así* y no *asá* ?» o «¿por qué *estas* leyes y no *aquellas* ?». Ninguna de las explicaciones propuestas hasta el momento lo ha conseguido, ni de lejos.

El marco inflacionario, desde luego, no lo ha logrado. La inflación requiere una lista de ingredientes que incluyen el espacio, el tiempo, el combustible cósmico que alimenta la expansión (el inflatón), además de todo el aparato técnico de la mecánica cuántica y la relatividad general, que a su vez descansan sobre matemáticas que van del cálculo multivariable y el álgebra lineal a la geometría diferencial. No conocemos ningún principio que señale estas leyes físicas particulares, articuladas mediante estos constructos matemáticos particulares, como punto de partida ineludible para explicar el universo. Al contrario, los físicos usamos observaciones y experimentos junto con una sensibilidad matemática intuitiva, difícil de describir, que nos guía hacia determinadas leyes físicas. Entonces analizamos las leyes matemáticamente para determinar bajo qué condiciones ambientales (si es que las hay) de los primeros momentos del universo se habría desencadenado la rápida expansión del espacio. Tras descubrir, felizmente, que existen esas

condiciones, «postulamos» que se dieron cerca del Big Bang y usamos las ecuaciones para determinar qué habría ocurrido a continuación.

Eso es lo máximo que podemos hacer a día de hoy. Y no es poco. Desde luego, resulta impresionante que podamos usar la matemática para describir lo que creemos que ocurrió hace casi catorce mil millones de años, y que a partir de ahí podamos predecir con éxito lo que deberían ver unos potentes telescopios. No cabe duda de que quedan muchas preguntas sin respuestas, como qué o quién creó la firme guía de las matemáticas, y qué o quién es responsable de que exista algo; pero incluso dejando todo eso sin respuesta, es mucho lo que hemos conseguido comprender sobre la evolución del cosmos.

Mi intención es utilizar ahora todo ese conocimiento para comprender cómo un universo con una entropía cada vez mayor, destinado a un desorden cada vez mayor, crea por el camino una gran cantidad de orden. Con eso como objetivo, comencemos por la más básica de las observaciones, a la que ya hemos aludido en el capítulo anterior. Si la entropía no ha dejado de crecer paulatinamente desde el Big Bang, antes de esa gran explosión la entropía debió ser mucho menor que en la actualidad[7].

¿Cómo debemos entender eso?

A estas alturas del libro ya estamos acostumbrados a encogernos de hombros cuando nos encontramos con una configuración de alta entropía, ya se trate de unas monedas dispuestas en una mezcla aleatoria de caras y cruces, ya del vapor de agua que de manera uniforme ocupa todo el espacio del baño, o los aromas que se dispersan por toda la casa. Las configuraciones de alta entropía son comunes, esperadas, vulgares. Pero cuando nos encontramos con una configuración de baja entropía, nuestra reacción es distinta. Una configuración de baja entropía es especial. Inusual. Reclama que expliquemos cómo llegó a producirse ese estado de orden.

Aplicado al universo primigenio, esta argumentación ha generado una buena dosis de preocupación, tanto científica como filosófica. ¿Mediante qué fuerza o proceso adquirió el universo primigenio una baja entropía? Un centenar de monedas cara arriba tiene baja entropía, pero admite una explicación inmediata: en lugar de tirar las monedas sobre la mesa, alguien se molestó en ordenarlas de ese modo. Pero ¿qué o quién dispuso la configuración de baja entropía del universo temprano? A falta de una teoría completa de los orígenes del cosmos, la ciencia no puede proporcionar una respuesta. De hecho, aunque es una pregunta que me ha tenido en vela muchas noches (literalmente), la ciencia todavía no es capaz de determinar si se trata de una cuestión que merezca la menor angustia. No disponer de una

teoría de por qué existe algo en lugar de no existir nada equivale a carecer de los medios para juzgar lo extraño u ordinario que es algo. Para evaluar si las condiciones particulares del universo temprano merecen que nos encojamos de hombros o nos quedemos sorprendidos y maravillados es necesario que primero definamos el proceso por el que se establecieron esas condiciones.

Uno de los escenarios que han imaginado los cosmólogos supone que el universo primigenio era un medio frenético y caótico en el que, en consecuencia, el valor del campo del inflatón habría fluctuado enormemente en el espacio, un poco como la superficie de un volumen de agua hirviendo. Para generar gravedad repulsiva y desatar la explosión del Big Bang, necesitamos una pequeña región del espacio en la que el valor del inflatón sea uniforme (o casi, si tenemos en cuenta la agitación cuántica). Encontrar una región así, uniforme en medio de ondulaciones caóticas, es como llevar a hervir un cazo de agua y encontrar que, en cierto momento, una parte de su agitada superficie se aplana. Eso no lo ha visto nadie. Nunca. Y no por imposible, sino por extraordinariamente improbable. Para que en un volumen de agua que bulle de forma aleatoria se encuentre una región a la misma altura en el mismo momento, produciendo una configuración de baja entropía (una superficie plana, ordenada y uniforme), haría falta una asombrosa coincidencia. De igual modo, para que el ondulante campo del inflatón adquiriese un valor uniforme en una pequeña región del espacio y, de este modo, desencadenase la expansión inflacionaria, habría hecho falta también una extraordinaria coincidencia. Y sin una explicación de cómo llegó a producirse esa especial configuración uniforme, ordenada, de baja entropía, los físicos se sienten desasosegados[8].

En busca de sosiego, algunos investigadores recurren a una simple observación: dado el tiempo suficiente, hasta lo más improbable ocurre. Si tiramos cien monedas un número suficiente de veces, al final conseguiremos que todas salgan cara. Mejor no aguantar la respiración hasta conseguirlo, pero ocurrirá. Del mismo modo, podemos argüir que en un medio caótico en el que el valor del inflatón fluctúa fuertemente, tarde o temprano, por puro azar, surgirá una diminuta región en la que las variaciones aleatorias que hacen que el valor del campo sea un poco más alto aquí o más bajo allá coincidan, y el campo posea el mismo valor en cada punto. Esto requiere una auténtica chiripa estadística que produzca más orden y, por consiguiente, menor entropía, pero tarde o temprano «ocurrirá». No a menudo. Pero de acuerdo con esta perspectiva, no hay por qué inquietarse. Como todas estas maquinaciones habrían ocurrido durante la prehistoria, antes de la rápida

expansión del espacio que llamamos Big Bang, no había por allí nadie con los brazos cruzados y zapateando nerviosamente a la espera de que se dispare la expansión inflacionaria. Así que podemos permitirnos que la actuación del telonero de la inflación se alargue todo el tiempo que haga falta. Solo cuando acaba produciéndose la chiripa estadística de un inflatón uniforme las cosas por fin cambian: se dispara el Big Bang, se produce la inflación del espacio y comienza la representación cosmológica.

Aunque nada de esto aborda las preguntas más fundamentales sobre el origen (es decir, el origen del espacio, del tiempo, de los campos, de las matemáticas), nos revela que un medio caótico puede producir las condiciones especiales de orden y baja entropía que requiere la inflación. Cuando una mota diminuta de espacio da por fin ese salto estadísticamente improbable hacia la baja entropía, la gravedad repulsiva se pone en acción y la impulsa hacia un universo en rápida expansión: el Big Bang.

Esta no es la única propuesta de cómo se podría haber desencadenado la expansión inflacionaria. Andréi Linde, uno de los pioneros de la cosmología inflacionaria, ha dicho medio en broma que por cada tres investigadores hay al menos nueve opiniones sobre el asunto[9]. Así que tendremos que dejar para la investigación futura, tanto teórica como observacional, una respuesta más definitiva a la pregunta de cómo una pequeña región de espacio quedó ocupada por un campo uniforme del inflatón y desencadenó un estallido de expansión espacial. Por el momento, nos limitaremos a suponer que de algún modo el universo primigenio hizo una transición hacia esa configuración altamente ordenada, de baja entropía, desató la explosión y nos permite declarar que el resto es historia.

Este es el punto de partida que nos permite por fin emprender nuestro viaje y explorar cómo se forman estructuras ordenadas como las estrellas y las galaxias dentro de un universo que se precipita hacia un futuro cada vez más desordenado.

El origen de la materia y el nacimiento de las estrellas

En el trascurso de una mil millonésima de una trillonésima de segundo después del Big Bang, la gravedad repulsiva expandió una minúscula región de espacio hasta un gigantesco tamaño, más quizá que las distancias más

lejanas a las que puedan acceder los más avanzados telescopios de los que disponemos[10]. El espacio permaneció lleno del campo del inflatón, pero en otra minúscula fracción de segundo, también eso cambió. Como la energía de la superficie de una pompa de jabón que se expande, la energía de una región de espacio llena de inflatón que se está expandiendo es precaria. Es inestable. Del mismo modo que la pompa de jabón acabará por estallar, transformando su energía en una neblina de gotitas de agua jabonosa, también el campo del inflatón acabó por «reventar»: se desintegró, transformando su energía en una niebla de partículas.

Desconocemos la identidad precisa de esas partículas, pero podemos decir con confianza que no eran los constituyentes de la materia habituales que todo el mundo aprende en el instituto. Sin embargo, al cabo de unos pocos minutos se produjo en todo el espacio una cascada de rápidas reacciones entre partículas: las más pesadas se desintegraron en multitud de partículas más ligeras y las partículas con fuertes afinidades se unieron formando conglomerados. Y así, aquel caldo primordial se transformó en una población de protones, neutrones y electrones, las partículas que hoy constituyen la materia (y probablemente también diversas partículas más extrañas, como la materia oscura, como atestigua una larga historia de observaciones astronómicas[11]). Poco tiempo después del Big Bang, el universo estaba ocupado por una neblina caliente y casi uniforme de partículas, algunas familiares, otras no tanto, que flotaban en un espacio que se iba inflando.

He matizado «uniforme» con un «casi» porque la agitación cuántica del campo del inflatón no solo produce variaciones de temperatura en el resplandor posterior al Big Bang; también hace que cuando el inflatón se desintegra, la densidad de las partículas resultantes varíe ligeramente en el espacio, apenas un poco más alta aquí que allá o acullá. Estas variaciones son cruciales para lo que ocurre a continuación: la sumamente importante tendencia hacia la formación de agregados como las estrellas o las galaxias. Una región un poco más densa que el espacio circundante ejerce un tirón gravitacional un poco más fuerte y, en consecuencia, atrae para sí un número mayor de las partículas de su entorno. La región se torna entonces todavía más densa, así que ejerce un tirón gravitacional algo más fuerte y absorbe más materia. Este efecto de bola de nieve impulsado por la gravedad produce agregados de materia cada vez más grandes. Transcurrido el tiempo suficiente, del orden de cientos de millones de años, la bola de nieve gravitatoria provoca aglomeraciones de partículas tan masivas, tan comprimidas y tan calientes que en su interior se desencadenan procesos

nucleares: nacen las estrellas. La incertidumbre cuántica, magnificada por la expansión inflacionaria y concentrada por el efecto de bola de nieve de la gravitación, produce los puntos de luz que salpican el firmamento nocturno.

La pregunta, entonces, es la siguiente: ¿cómo cuadra el proceso de formación de estrellas, en el que la gravedad fuerza a un caldo casi uniforme de partículas a formar estructuras astrofísicas ordenadas, con la segunda ley, que decreta un aumento del desorden? La respuesta nos obligará a examinar con algo más de atención las vías que llevan a un aumento de entropía.

Obstáculos en el camino hacia el desorden

Cuando cocemos pan en el horno, las partículas que emanan se dispersan ocupando un volumen cada vez mayor, y la entropía crece. Pero si nos encontramos en una habitación alejada, no disfrutaremos al instante del aroma del pan recién horneado. Hace falta un tiempo para que el olor se extienda por toda la casa. Hay que esperar a que las moléculas del aroma se esparzan y adopten las configuraciones de entropía más alta que tienen a su disposición. Eso es lo habitual. Los sistemas físicos no pueden, por lo general, saltar directamente a la configuración de máxima entropía, sino que, a medida que las partículas del sistema deambulan al azar de un lado para otro, la entropía aumenta de manera gradual hacia el máximo posible.

De camino a la entropía más alta pueden encontrarse obstáculos que impidan el progreso. Si sellamos el horno o cerramos la puerta de la cocina, conseguimos que el aroma lo tenga más difícil para esparcirse y, por lo tanto, frenamos el aumento de la entropía. Esos obstáculos se deben a la intervención humana, pero existen otras situaciones en las que los obstáculos surgen de las propias leyes que rigen las interacciones físicas. Un ejemplo que me resulta familiar a causa de un accidente de mi infancia tiene que ver precisamente con un horno.

Cuando tenía diez años, volví un día a casa desde el colegio y decidí calentar un trozo de pizza que había en la nevera. Puse el horno a 200 ºC, deslicé la porción sobre la rejilla de en medio y esperé. Al cabo de unos diez minutos comprobé cómo estaba y para mi sorpresa descubrí que seguía tan fría como antes. Me di cuenta entonces de que había abierto el gas, pero no había encendido la llama. (Nuestro modesto horno, típico de aquellos días, no

tenía un piloto siempre encendido, sino que había que prender la llama cada vez). Siguiendo paso a paso lo que había aprendido viendo cómo lo hacían mis padres cientos de veces, me incliné hacia el horno y encendí una cerilla con la intención de introducirla en la pequeña oquedad del piloto. Para entonces, sin embargo, se había acumulado una cantidad no despreciable de gas en el interior del horno, y en cuanto encendí la cerilla, explotó. Una pared de llamas se abalanzó sobre mí. Cerré los ojos tan fuertemente como pude, pero me quemé las cejas, las pestañas, y acabé con la cara y las orejas con quemaduras de segundo y tercer grado. La lección inmediata para la vida, reforzada por mis padres y por los meses de dolorosa recuperación, fue sobre el uso correcto de los aparatos de la cocina. (Al final conseguí superarlo y ahora soy quien más cocina en casa, aunque todavía experimento momentos de inquietud cuando alguno de mis hijos prepara su propia comida y enciende el horno). Pero la lección científica, mucho más amplia, es que puede haber obstáculos en el camino hacia una mayor entropía que solo se superan con la ayuda de un catalizador. Veamos a qué me refiero.

El gas natural (que es sobre todo metano, una unión de carbono e hidrógeno) puede coexistir pacíficamente con el oxígeno del aire; las moléculas de estos gases pueden mezclarse sin problema. Sin embargo, a medida que las moléculas se esparcen y entremezclan, hay una configuración peculiar y de entropía mucho más alta que llama con fuerza. Pero esa configuración no puede alcanzarse simplemente permitiendo a las moléculas que sigan esparciéndose. La configuración de mayor entropía requiere de una reacción química. No hace falta agobiarse con los detalles: los recordaremos con brevedad. Una molécula de gas natural puede combinarse con dos moléculas de oxígeno para producir una molécula de dióxido de carbono, dos de agua y, lo que es más importante, un estallido de energía. A nivel molecular, esto es lo que significa que el gas natural se queme. La reacción química libera energía que estaba almacenada en los fuertes enlaces que mantenían la integridad de las moléculas de gas, un poco como cuando se rompen unas gomas tirantes. En el caso de mi andanza con el horno, el abrasador estallido de energía (moléculas muy agitadas que se movían muy deprisa) acabó quemándome la cara. Todo lo cual nos dice que al liberar energía almacenada en enlaces químicos ordenados y transformarla en el movimiento rápido y caótico de las moléculas, esas reacciones químicas producen un súbito aumento de la entropía.

Aunque los detalles sean específicos del desafortunado accidente de un niño, el episodio ilustra un principio químico ampliamente aplicable. En el

camino de la entropía puede haber obstáculos: por sí solos, el gas natural y el oxígeno no se combinan, no se queman y no alcanzan la configuración posible de más alta entropía. Solo pueden salvar el obstáculo entrópico con la ayuda de un catalizador que prenda la reacción. En mi accidente, el catalizador fue la cerilla. La pequeña llama prendida por mi yo infantil desencadenó un efecto dominó. La energía del fuego rompió los enlaces que mantenían la integridad de las moléculas de gas natural, y los átomos de oxígeno e hidrógeno quedaron libres para combinarse con átomos de oxígeno de su entorno, liberando más energía que rompió más enlaces del gas natural, y así sucesivamente. La explosión fue la cascada de energía generada por la rápida reorganización de los enlaces químicos.

Conviene observar que los enlaces químicos dependen de la fuerza electromagnética. Los protones, de carga positiva, atraen electrones, de carga negativa («las cargas eléctricas opuestas se atraen»), y de este modo sujetan los constituyentes atómicos en las uniones moleculares. Y eso significa que el salto entrópico desde la calmada mezcla de moléculas de gas hasta la combustión explosiva generada por la rotura y formación de enlaces químicos viene impulsado por la fuerza electromagnética. Así ocurre en muchos de los procesos de nuestra experiencia cotidiana que comportan un aumento de la entropía.

Aunque menos familiares aquí en la Tierra, en los episodios que se despliegan de forma repetida en el cosmos la evolución hacia una mayor entropía suele verse impulsada por otras fuerzas de la naturaleza: la gravitatoria y las nucleares (la fuerza nuclear fuerte mantiene unidos los núcleos atómicos, mientras que la fuerza nuclear débil produce la desintegración radiactiva). Y de modo parecido a lo que acabamos de comentar para el caso de la fuerza electromagnética, el camino hacia una mayor entropía a caballo de la gravedad y las fuerzas nucleares tampoco tiene por qué estar libre de impedimentos. Pueden existir obstáculos y, de hecho, suele haberlos. La manera que tiene la naturaleza de superarlos (el análogo cósmico de mi cerilla) es sutil, pero sumamente importante. Entre las estructuras transitorias que se forman a lo largo del camino por el que la gravedad y las fuerzas nucleares guían al universo hacia una mayor entropía están las estrellas y los planetas y, en el nuestro, la vida. Pese a toda su majestuosidad, estas configuraciones ordenadas son motores de la naturaleza que aprovechan la gravedad y las fuerzas nucleares para empujar el cosmos hacia la resolución de su potencial entrópico.

Veamos primero el caso de la gravedad.

Gravedad, orden y la segunda ley

La gravedad es la más débil de las fuerzas de la naturaleza. Basta un simple experimento para ponerlo de manifiesto. Cuando tomamos una moneda, los músculos del brazo vencen el tirón gravitatorio del planeta entero. Sea uno enclenque o fornido, la victoria sobre el tirón gravitatorio de todo un planeta deja en evidencia la debilidad intrínseca de la gravedad. La única razón de que seamos conscientes de la gravedad es que se trata de una fuerza acumulativa: cada pedacito de la Tierra tira de cada pedacito de una moneda, o de este libro, o de uno mismo, y como el planeta es enorme, todos esos pequeños tirones se acumulan en la fuerza que nos pega al suelo. Pero la atracción gravitatoria entre las cosas más pequeñas, por ejemplo dos electrones, es mil millones de billones de trillones de veces más débil que su repulsión electromagnética.

La debilidad intrínseca de la gravedad es la razón de que ni siquiera la mencionase cuando hablamos de la entropía. Si consideramos los efectos de la gravedad en situaciones cotidianas como la dispersión del vapor de la ducha o de los aromas por la casa, la discusión de la entropía apenas cambia. Claro que la gravedad tira de las moléculas un poquito hacia abajo y hace que la densidad del vapor sea levemente mayor cerca del suelo del baño, pero el efecto es tan pequeño que para una comprensión cualitativa apenas merece atención. Sin embargo, cuando nos movemos de lo cotidiano a los procesos astronómicos, que implican mucha más materia, descubrimos una interacción profundamente importante entre la entropía y la fuerza gravitatoria.

Debo advertir de que las ideas que explicaré ahora son algo complejas, así que el lector puede saltar a la siguiente sección, donde las encontrará resumidas, en cuanto la discusión se le antoje demasiado espesa. Pero la recompensa de seguirme el hilo merece la pena: es la explicación de cómo la gravedad esculpe, de manera espontánea, orden en un cosmos cada vez más desordenado.

Imaginemos una versión cósmica de la escena del pan en el horno. En lugar de la casa, podemos pensar en una enorme caja, mucho mayor que el Sol, que flota en medio de un espacio por lo demás vacío. Y en lugar de los aromas que escapan del horno, supongamos que empezamos con una bola de gas (para ser precisos, digamos que es de hidrógeno, que es el elemento más simple de la tabla periódica), e imaginemos que las moléculas comienzan a

esparcirse desde el centro de la caja. Nuestra experiencia con la dispersión del aroma del pan por la casa nos lleva a esperar que el gas evolucione hacia una entropía mayor, con las moléculas esparcidas de manera uniforme por toda la caja. Pero ahora cambiaremos un poco las cosas. A diferencia del caso del pan horneado, pongamos tantas moléculas en la bola de gas que la gravedad «importe»: el tirón gravitacional que experimenta cada molécula debido al tirón gravitacional combinado de todas y cada una de las incontables moléculas de gas afecta ahora de manera significativa al movimiento de la molécula en cuestión. ¿Cómo altera eso nuestra conclusión?

Nos será útil ponernos en la piel de una molécula de gas situada en la avanzadilla de la dispersión. A medida que nos alejamos del grupo central, notamos cómo la atracción gravitatoria de todas las otras moléculas nos tira para atrás. Esa fuerza nos frena. Una velocidad menor implica una temperatura menor, así que a medida que la nube de gas aumenta su volumen al expandirse, hacia la frontera, la temperatura disminuye. Recordémoslo, y demos ahora un salto hacia la perspectiva de una molécula situada cerca de la masa principal de la nube. Al estar más cerca, sentimos un tirón gravitatorio mucho más fuerte en comparación con nuestra anterior experiencia en la lejana frontera. De hecho, con un número suficiente de moléculas, el tirón gravitatorio combinado será lo bastante fuerte como para impedirnos que migremos hacia fuera. Al contrario, nos veremos atraídos hacia el interior, de modo que caeremos hacia el centro de la nube de gas, aumentando la velocidad por el camino. Como una velocidad más alta implica una temperatura más alta, la gravedad hará que el núcleo de la nube de gas se encoja, reduzca su volumen y aumente su temperatura.

En el caso del pan horneado esperábamos que, con el tiempo, el gas se distribuyese por toda la caja hasta alcanzar una temperatura uniforme. Pero cuando la gravedad importa, lo que sucede es completamente distinto. La gravedad hace que algunas moléculas se vean atraídas hacia un núcleo más denso y caliente, mientras que otras se esparcen hacia una corteza más fría y difusa que envuelve el núcleo.

Por modestas que puedan parecer estas observaciones, acabamos de descubrir una de las más influyentes manos que rigen el orden en el universo. Veamos de qué modo.

Cuando estrechamos entre nuestros dedos el tazón del café matutino, nunca lo encontramos más caliente que en el momento de servirlo. La razón de ello es que el calor solo fluye de una temperatura más alta a una temperatura más baja, así que el café caliente transfiere parte de su calor a su

entorno más frío, y eso hace que descienda la temperatura del líquido[12]. En nuestra gran nube de gas, el calor también fluye desde el núcleo central caliente hacia la capa exterior, más fría. No se puede recriminar a nadie por creer que este flujo de calor vaya a enfriar el núcleo pero también la capa exterior, acercando sus temperaturas de modo parecido a como el calor transferido de la taza de café al aire acerca la temperatura del líquido a la temperatura ambiente. Sin embargo, y esto es algo notable y sumamente importante, cuando la gravedad entra en juego, la conclusión se invierte. A medida que el calor fluye desde el núcleo hacia fuera, el núcleo se calienta y la capa exterior se enfría.

Esto puede parecernos incongruente, pero para entenderlo no hay más que unir los puntos que ya hemos marcado. A medida que la capa exterior absorbe calor del núcleo, la energía adicional lleva a la nube a inflarse todavía más. Y como las moléculas que se mueven hacia fuera son frenadas por el tirón de la gravedad, pierden velocidad[13]. El efecto neto es que la temperatura de la capa exterior, que se encuentra en expansión, no aumenta, sino que disminuye. Al contrario, a medida que el núcleo libera calor, la reducción de energía hace que se contraiga todavía más, y como al desplazarse hacia el centro las moléculas se mueven en la misma dirección que el tirón de la gravedad, a medida que caen ganan velocidad, de modo que, al contraerse, la temperatura del núcleo aumenta en lugar de disminuir.

Si el café hiciera lo mismo, habría que darse prisa en beberlo. Cuanto más tardásemos en hacerlo, más calor liberaría al aire del ambiente y más caliente estaría. Eso, en el caso del café, es absurdo, pero en una nube de gas lo bastante grande como para que la gravedad desempeñe un papel dominante, es precisamente lo que ocurre.

Si lo pensamos un momento, comprenderemos enseguida que nos encontramos ante un proceso que se autoamplifica, un poco como ocurre con la deuda de una tarjeta de crédito, que cuanto más debemos, más interés nos cobra y más se incrementa la suma, en una espiral endemoniada. En el caso de la nube de gas, a medida que el núcleo se contrae y su temperatura aumenta, libera más calor a su entorno, que está más frío, haciendo que el núcleo se contraiga todavía más y suba su temperatura. Al mismo tiempo, el calor absorbido por la capa exterior hace que se expanda más y baje su temperatura. A medida que se ensancha la brecha de temperatura entre el núcleo y la corteza, más fuertemente fluye el calor, y el ciclo entra en una espiral.

Salvo intervención o cambio de circunstancias, este ciclo se amplifica a sí mismo y no cesa. En el caso de la deuda creciente de una tarjeta de crédito, la intervención sería pagar o declararse en bancarrota. En el núcleo comprimido que no para de elevar su temperatura, la naturaleza interviene con un nuevo proceso físico: la «fusión nuclear». Cuando un conjunto de átomos alcanza la suficiente temperatura y densidad, colisionan entre ellos con tal fuerza que llegan a unirse aún más íntimamente que en procesos químicos como la combustión del gas natural. Mientras que la combustión química es una reacción en la que están implicados los electrones que rodean a los átomos, la fusión nuclear es una reacción que une los núcleos del centro de los átomos. Mediante esa profunda unión, la fusión nuclear genera enormes cantidades de energía que se manifiesta en forma de partículas muy veloces. Y es ese rápido movimiento térmico genera una presión hacia fuera que llega a compensar la fuerza hacia dentro de la gravedad. En ese momento, la fusión nuclear en el centro de la estrella frena la contracción. El resultado es una fuente concentrada, estable y sostenida de luz y calor.

Ha nacido una estrella.

Para entender cómo puntúan estos procesos de formación en el contador de la entropía, sumemos las contribuciones. Tanto el núcleo de la nube de gas, que se convierte en la estrella, como la capa exterior de gas que lo rodea, están sujetos a dos efectos entrópicos opuestos. En el caso del núcleo, la temperatura aumenta, lo cual incrementa la entropía, mientras que el volumen disminuye, lo cual reduce la entropía. Solo un cálculo detallado[14] puede determinar quién gana, y el resulta es que la reducción supera al aumento: la entropía neta del núcleo se reduce. La formación de grandes agregados gravitacionales, como las estrellas, es decididamente un paso hacia un mayor orden. En el caso de la capa exterior, el volumen crece, lo cual hace que aumente la entropía, pero la temperatura baja, y eso reduce la entropía. Una vez más, se necesita un cálculo detallado para determinar el ganador, y el resultado es que el aumento supera la disminución, de modo que la entropía neta de la capa exterior aumenta. Y lo que es más importante, los cálculos establecen que el aumento de entropía de la capa exterior es mayor que la reducción de entropía del núcleo, de manera que el proceso entero produce un incremento global de la entropía, y eso le vale un bien merecido gesto de aprobación de la segunda ley.

Esta cadena de sucesos, muy idealizada y simplificada, nos muestra cómo puede producirse una estrella (una bolsa de baja entropía, una bolsa de orden) de manera espontánea, sin necesidad de ningún ingeniero que dirija la acción,

y de manera que la segunda ley de la termodinámica, que dicta que la entropía total siempre aumenta, mantenga plena vigencia. En comparación con una máquina de vapor, el escenario cósmico es más exótico, pero lo que nos hemos encontrado es un nuevo ejemplo del paso a dos de la entropía. Del mismo modo que una máquina de vapor y su entorno representan su danza termodinámica (el artefacto libera calor residual y reduce su entropía mientras que su entorno absorbe el calor y aumenta la suya), una nube de gas lo bastante grande como para que la gravedad importe realiza un *pas de deux* análogo. A medida que el centro de la nube de gas se contrae bajo el tirón de la gravedad, reduce su entropía, pero durante el proceso libera calor que incrementa la de su entorno. Se crea así una región local de orden dentro de un entorno que experimenta un aumento de desorden comparativamente mayor.

Lo nuevo de la versión gravitatoria del paso a dos de la entropía es que se sustenta a sí misma. A medida que la nube de gas se contrae y emite calor, su temperatura aumenta, lo que provoca un flujo de calor aún mayor hacia el exterior que hace que la danza dé un paso más. En comparación, cuando la máquina de vapor realiza trabajo y emite calor, su temperatura disminuye. Si no quemamos más combustible para calentar de nuevo el vapor, la máquina se para. Por eso requiere de una inteligencia que lo diseñe, construya y opere, mientras que la región de orden creada por la contracción de una nube de gas, la estrella, es esculpida y alimentada por la fuerza de la gravedad, sin que intervenga mente alguna.

Fusión, orden y la segunda ley

Evaluemos la situación.

Cuando la influencia de la gravedad es mínima, la segunda ley lleva a un sistema hacia la homogeneidad. Las cosas se esparcen, la energía se difunde, la entropía aumenta. Si eso fuese todo, la historia del universo sería insulsa de principio a fin. Pero cuando hay materia suficiente para que se note la influencia de la gravedad, la segunda ley da un rápido giro y aleja al sistema de la homogeneidad. La materia se agrega aquí y se esparce allá. La energía se concentra aquí y se difunde allá. La entropía se reduce aquí y aumenta allá. La forma en que se ejecutan las directrices de la segunda ley depende de

manera sensible de la fuerza de la gravedad. Cuando esta es suficiente (es decir, cuando se aglomera suficiente materia), pueden formarse estructuras ordenadas. Eso enriquece de manera enorme la evolución del universo.

Tal como lo hemos descrito, la protagonista de este proceso es la fuerza de la gravedad. En comparación, la fuerza nuclear, responsable de la fusión, parece ser decididamente secundaria. Su papel parece limitarse a una intervención: la fusión es responsable de la presión hacia fuera que frena el colapso que provoca la gravedad. De hecho, los científicos a menudo lo resumen diciendo que la gravedad es la fuente última de toda la estructura del cosmos, como si la fuerza fuerte no fuese importante. Sin embargo, una valoración más justa reconoce una sociedad paritaria entre la gravedad y la fuerza nuclear, que trabajan al alimón para mover la trama de la segunda ley.

Lo importante es que la fuerza nuclear también danza el paso a dos de la entropía. Cuando se fusionan núcleos atómicos (como en el Sol, donde los núcleos de hidrógeno se fusionan formando helio miles de millones de veces por segundo), el resultado es un agregado atómico más complejo, más delicadamente organizado y de menor entropía. Durante el proceso, algo de la masa de los núcleos originales se convierte en energía (tal como prescribe $E = mc^2$), en su mayor parte en forma de una lluvia de fotones que calienta el interior de la estrella y alimenta la emisión de luz desde su superficie. Y es gracias a esa ardiente luz, a ese torrente de fotones, como la estrella transfiere enormes cantidades de entropía a su entorno. Tal como vimos en el caso de la máquina de vapor o de la contracción de la nube de gas, el aumento de la entropía en el entorno es mayor que el necesario para compensar la reducción de entropía debida a la fusión de los núcleos, garantizándose de este modo que la entropía neta aumenta y que, una vez más, la integridad de la segunda ley queda inviolada.

Del mismo modo que el gas natural y el oxígeno necesitan un catalizador (como la cerilla que yo encendí) para iniciar la combustión química, los núcleos atómicos requieren de un catalizador que inicie la fusión nuclear. En las estrellas, este no es otro que la fuerza de la gravedad, que apretuja la materia del núcleo hasta que está lo bastante densa y caliente como para que comience la fusión. Una vez iniciada, la fusión alimenta a una estrella durante miles de millones de años, sintetizando sin cesar núcleos atómicos complejos gracias a una fuente de entropía, de otro modo inasequible, que esparce hacia el exterior en forma de luz y calor. Y, tal como discutiremos en el siguiente capítulo, esos productos (átomos complejos y un baño continuo de luz) son esenciales para la formación de estructuras aún más ricas e intrincadas,

incluidos nosotros mismos. Así, aunque la gravedad es la fuerza vital para la formación de una estrella y para mantener un entorno estelar estable, durante miles de millones de años es la fuerza nuclear la que se bate en el frente, la que hace avanzar la carga entrópica. Desde esta perspectiva, el papel de la gravedad pasa de protagonista principal a pareja indispensable en un largo dueto.

En pocas palabras, y además antropomorfizadas, lo que ocurre es que el universo aprovecha de forma ingeniosa la fuerza nuclear y la gravitatoria para hacerse con un tesoro de entropía que yace escondido en sus propios constituyentes materiales. Sin la gravedad, las partículas uniformemente esparcidas, como el aroma que llena una casa, alcanzarían la máxima entropía disponible. Pero con la gravedad, las partículas apretujadas en madejas densas y masivas y apoyadas en la fusión nuclear empujan aún más arriba la entropía.

Esta versión del paso a dos de la entropía, catalizada por la gravedad y ejecutada por la fuerza nuclear, es la que la materia baila por todo el universo. Es el proceso que dominó la coreografía cósmica desde instantes después del Big Bang y que dio origen a un ingente número de estrellas, unas estructuras astronómicas ordenadas cuya luz y calor han permitido que, por lo menos en un caso, surja la vida. Como veremos en el próximo capítulo, este acontecimiento implica a la compañera de la entropía, la evolución, que es la que consigue dar forma a las estructuras más exquisitamente complejas del universo.

4

INFORMACIÓN Y VITALIDAD

De la estructura a la vida

«Estimado profesor Schrödinger —comenzaba la humilde carta que en 1953 escribió el biólogo Francis Crick a Erwin Schrödinger, uno de los padres fundadores de la mecánica cuántica y premio Nobel de Física en 1933—. Un día Watson y yo estuvimos hablando de cómo habíamos acabado en el campo de la biología molecular, y descubrimos que había influido en ambos su pequeño libro, *¿Qué es la vida?* —Crick siguió la referencia al libro de Schrödinger con una euforia apenas contenida—. Pensamos que quizá le interesen los artículos adjuntos; como verá, su término «cristal aperiódico» ha resultado ser perfectamente adecuado»[1].

El Watson al que Crick se refiere es, naturalmente, James Watson, coautor con Crick de los «artículos adjuntos», que, todavía calientes de la imprenta, incluían un texto científico que habría de convertirse en uno de los más célebres del siglo XX. En la publicación, aquel manuscrito no ocupaba más que una página de la revista, pero eso fue suficiente para exponer la geometría en doble hélice del ADN y conseguir para Crick y Watson, junto con Maurice Wilkins, del King's College, el premio Nobel de Fisiología o Medicina de 1962[2]. Curiosamente, Wilkins también reconoció que el libro de Schrödinger había encendido la llama de su pasión por determinar la base molecular de la herencia; en palabras de Wilkins, «me puso en marcha»[3].

Schrödinger escribió *¿Qué es la vida?* en 1944 a raíz de una serie de ponencias públicas que había pronunciado el año anterior en el Instituto de Estudios Avanzados de Dublín. Al anunciar estas charlas, Schrödinger había advertido de que el tema era difícil («las conferencias no se pueden calificar de populares», dijo textualmente), pero aun así quiso mantener el loable

compromiso de explorar a fondo el tema, aunque fuese a costa de una menor audiencia[4]. Pese a ello, durante tres viernes consecutivos de febrero de 1943, mientras en el continente se libraba la segunda guerra mundial, un público de más de cuatrocientas personas (entre ellas el primer ministro irlandés, varios dignatarios y acaudalados miembros de la alta sociedad) abarrotaron una sala de conferencias situada en lo alto de la mole gris del Fitzgerald Building, en el campus del Trinity College, para escuchar cómo aquel físico nacido en Viena se enfrentaba a la ciencia de la vida[5].

El propósito de lo que el propio Schrödinger calificaba de ataque era realizar progresos en torno a una pregunta principal: «¿cómo pueden la física y la química explicar los eventos “en el espacio y el tiempo” que tienen lugar dentro de los límites espaciales de un organismo?». O, en una paráfrasis más llana: las rocas y los conejos son distintos. Pero ¿cómo? ¿Y por qué? Cada uno de ellos es un enorme conjunto de protones, neutrones y electrones, y todas estas partículas, con independencia de si están confinadas en una roca o en un conejo, están gobernadas por las mismas leyes de la física. Entonces ¿qué ocurre en el interior del cuerpo de un conejo que hace que ese conjunto de partículas sea tan profundamente distinto de la colección de partículas que constituye una roca?

Este es el tipo de preguntas que se plantea un físico. Estos científicos suelen ser reduccionistas, así que tienden a buscar explicaciones de los fenómenos complejos que se basen en las propiedades e interacciones de sus constituyentes más simples. Mientras que los biólogos suelen definir la vida por sus principales actividades (la vida capta materiales para alimentar las funciones que la sustentan, excreta los desechos que generan esos procesos y, con suerte, se reproduce), Schrödinger buscaba una respuesta a la pregunta de ¿qué es la vida? en los propios puntales físicos fundamentales de la misma.

La seducción del reduccionismo es poderosa. Si pudiéramos identificar qué es lo que dota de vida a un conjunto de partículas, qué magia molecular enciende el fuego de la vida, daríamos un gran paso para comprender el origen de esta y su ubicuidad (o no) en el cosmos. Más de medio siglo después, pese a los pasos agigantados que se han dado en la física y, sobre todo, en la biología molecular, todavía andamos buscando respuesta a variaciones sobre la pregunta de Schrödinger. Aunque se han hecho grandes progresos en la descomposición de la vida (y, en general, de la materia) en sus partes constituyentes, los investigadores todavía se enfrentan a la formidable tarea de explicar cómo surge esta en configuraciones particulares de esos constituyentes. Esa síntesis es parte esencial del programa reduccionista. Al

fin y al cabo, cuanto más finamente se examina algo que está vivo, más difícil es ver que vive. Si nos fijamos en una sola molécula de agua, un átomo de hidrógeno o un electrón individual, vemos que ninguno de ellos lleva una marca que indique si es un constituyente de algo vivo o de algo muerto, de algo animado o inanimado. La vida se reconoce por el comportamiento colectivo, por la organización a gran escala, por la coordinación general de un enorme conjunto de constituyentes fundamentales (una sola célula contiene más de un billón de átomos). La pretensión de entender la vida concentrándose en las partículas fundamentales se parece a la de experimentar una sinfonía de Beethoven instrumento a instrumento, nota a nota.

El propio Schrödinger hizo hincapié en su primera conferencia en una versión de esta misma cuestión. Si un cuerpo o un cerebro pudieran quedar afectados por el movimiento caprichoso de un átomo o un puñado de átomos, pobres serían sus perspectivas de supervivencia. Para evitar esa sensibilidad, señaló Schrödinger, los cuerpos y los cerebros están hechos de grandes conjuntos de átomos que pueden mantener su altamente coordinada funcionalidad incluso cuando los átomos individuales se agitan al azar. Así pues, el propósito de Schrödinger no era revelar la vida en un solo átomo, sino erigir, sobre el conocimiento de estas partículas, una explicación física de cómo puede reunirse un gran conjunto de átomos para formar algo vivo. A su entender, esta era una búsqueda muy amplia que probablemente requeriría que la ciencia ensanchase sus cimientos intelectuales. De hecho, en un epílogo a *¿Qué es la vida?*, refiriéndose a la conciencia, Schrödinger sorprendió a más de uno (y perdió su primer editor) al invocar los Upanishads hindúes para sugerir que todos formamos parte de un «yo eterno, omnipresente, que todo lo abarca» y que la libre voluntad que todos ejercemos es reflejo de nuestros poderes divinos[6].

Aunque mi opinión sobre la libre voluntad difiere de la de Schrödinger (como veremos en el capítulo 5), sí comparto su afinidad por un amplio horizonte de explicación. Los misterios profundos piden ser clarificados por medio de una colección de relatos encajados. Sea reduccionista o emergente, matemática o figurativa, científica o poética, solo conseguimos enriquecer nuestra comprensión cuando enfocamos las preguntas desde varias perspectivas distintas.

Relatos encajados

Durante los últimos siglos la física ha ido puliendo su propia colección de relatos encajados, organizados unos dentro de otros en función de las distancias para las que cada narración es relevante. Esta estructura ocupa un lugar central en el enfoque que los físicos incansablemente intentamos inculcar en nuestros alumnos. Para entender cómo una pelota de béisbol momentáneamente deformada por el rápido golpe del bate de Mike Trout retorna a su forma esférica, necesitamos analizar la estructura molecular de la pelota. Es ahí donde innumerables fuerzas microfísicas empujan contra la deformación y lanzan la bola en su viaje. Pero esta perspectiva molecular resulta inútil para entender la trayectoria de la pelota. Los voluminosos datos necesarios para seguir el movimiento de billones de billones de moléculas mientras la bola gira y se eleva sobre la valla izquierda resultarían del todo incomprensibles. Cuando se trata de la trayectoria, tenemos que adoptar una perspectiva alejada de lo molecular y examinar el movimiento de la pelota como un todo. Hay que contar una historia relacionada, pero distinta, situada a un nivel más alto.

Este ejemplo ilustra algo simple pero muy relevante que debemos comprender: las preguntas que nos hacemos determinan los relatos que proporcionan las respuestas útiles. Es una estructura narrativa que saca partido de una de las cualidades más fortuitas de la naturaleza. A cada una de las escalas, el universo es coherente. Newton no sabía nada de quarks y electrones, pero si le diésemos la velocidad y dirección de la pelota en el momento en que se despega del bate de Mike Trout, calcularía su trayectoria con los ojos cerrados. Gracias a los avances de la física desde los tiempos de Newton, hemos podido sondear capas de estructura más finas, y hemos llenado en buena medida las lagunas en nuestro conocimiento. Sin embargo, la descripción a cada paso tiene sentido por sí misma. Si no fuera así (si para entender, por ejemplo, el movimiento de una pelota de béisbol tuviéramos que entender el comportamiento cuántico de sus partículas), nos costaría ver de qué modo hemos progresado. Divide y vencerás ha sido desde hace mucho tiempo el grito de guerra de los físicos, una estrategia que nos ha valido grandes triunfos.

Un reto igual de importante es el de reunir los relatos discretos en una narración continua. En el caso de la física de partículas y de campos, esa

síntesis la consiguió, en su forma más refinada, Ken Wilson, lo que le valió el premio Nobel de 1982[7]. Wilson desarrolló un procedimiento matemático para analizar sistemas físicos a distintas distancias (desde escalas mucho más pequeñas que, por ejemplo, las que investiga el Gran Colisionador de Hadrones, hasta las distancias atómicas, mucho mayores, que llevamos estudiando más de un siglo), y luego conectar sistemáticamente los relatos, clarificando de qué modo cada uno de ellos traspasa su testigo narrativo al siguiente cuando la escala migra fuera de su dominio particular. El método, que se conoce como «grupo de renormalización» y se encuentra en el núcleo de la física moderna, nos dice cómo hay que cambiar el lenguaje, el marco conceptual y las ecuaciones utilizadas para analizar la física a una escala de distancias cuando movemos el foco a otra escala. Usando este método para desarrollar un conjunto encajado de descripciones diferenciadas y definir cómo una de ellas informa a las adyacentes, los físicos han derivado predicciones detalladas que se han confirmado mediante un gran número de experimentos y observaciones.

Aunque la técnica de Wilson está pensada para las herramientas matemáticas de la moderna física de alta energía (la mecánica cuántica y su generalización, la teoría cuántica de campos), la idea general es de amplia aplicación. Hay muchas maneras de entender el mundo. En la organización tradicional de las ciencias, la física se ocupa de las partículas elementales y de sus diversas uniones; la química, de los átomos y las moléculas; y la biología, de la vida. Esta categorización, que todavía usamos pero era mucho más prominente cuando yo era estudiante, proporciona una demarcación razonable, aunque un tanto burda, de las ciencias en función de la escala. En tiempos más recientes, sin embargo, a medida que los investigadores han ahondado en sus indagaciones, se han percatado de lo esencial que resulta comprender los puntos de encuentro entre disciplinas. Las ciencias no están separadas. Y cuando se desplaza el foco de la vida a la vida inteligente, otras disciplinas que se solapan (lenguaje, literatura, filosofía, historia, arte, mito, religión, psicología…) pasan a ocupar un lugar central en la crónica. Hasta el más acérrimo de los reduccionistas comprende que del mismo modo que sería vano intentar explicar la trayectoria de una pelota de béisbol a partir de los movimientos moleculares, más lo sería aún invocar esa perspectiva microscópica para explicar lo que siente el bateador cuando el lanzador acaba su lanzamiento, el público ruge y se acerca una bola rápida. Eso se entiende mucho mejor con relatos de nivel más alto explicados en el lenguaje de la reflexión humana. No obstante (y esta es la clave) esos relatos más propios

del nivel humano deben ser compatibles con la explicación reduccionista. Somos criaturas físicas sometidas a las leyes físicas. Así que no se gana nada con que los físicos clamen que su marco explicativo es el más fundamental o que los humanistas se mofen de la soberbia del reduccionismo desenfrenado. Se gana en comprensión cuando el relato de cada disciplina se integra en una narración de finos matices[8].

En este capítulo nos ceñiremos a una perspectiva reduccionista, conscientes de que en otros posteriores exploraremos la vida y la mente desde una sensibilidad humanista complementaria. Aquí discutiremos el origen de los ingredientes atómicos y moleculares necesarios para la vida, el origen de un medio particular (el Sol y la Tierra) en el que esos ingredientes se mezclaron del modo preciso para que la vida surgiera y floreciera, y exploraremos la unidad profunda de la vida en la Tierra examinando algunos de los extraordinarios procesos y estructuras que a escala microfísica subyacen a todos los seres vivos[9]. Aunque no daremos respuesta a la pregunta sobre el origen de la vida (que sigue siendo un enigma), veremos que todo nos lleva a pensar que toda la vida en la Tierra se remonta a una única especie unicelular ancestral, estableciendo así de forma muy definida lo que la ciencia del origen de la vida habrá de explicar en último término. Esto nos llevará a examinar la vida desde la perspectiva termodinámica, de tan amplia aplicación, que desarrollamos en el capítulo anterior, y revelaremos que los seres vivos comparten un profundo parentesco no solo entre ellos, sino también con las estrellas y las máquinas de vapor: la vida es una manera más que tiene el universo de liberar la entropía potencial encerrada en la materia.

No pretendo ser enciclopédico, sino proporcionar tan solo los detalles justos para que se perciban los ritmos de la naturaleza, los que reverberan desde el Big Bang hasta la vida en la Tierra.

El origen de los elementos

Si molemos algo que antes haya estado vivo hasta obtener un fino polvo y husmeamos en su compleja maquinaria molecular, siempre encontraremos en abundancia seis tipos de átomos: carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo y azufre, una colección de elementos que los estudiantes recuerdan a

veces con el acrónimo SPONCH (que no debe confundirse con la galleta mexicana de malvavisco del mismo nombre). ¿De dónde salen estos ingredientes atómicos de la vida? La respuesta que hoy damos a esta pregunta es uno de los mayores logros de la cosmología moderna.

La receta para construir un átomo, por complejo que sea, es directa. Hay que reunir el número apropiado de protones y neutrones, apretujarlos en una bola diminuta (el núcleo), rodear esta con un número de electrones igual al de protones y colocar los electrones en las órbitas concretas que dicta la física cuántica. Eso es todo. El reto es que, a diferencia de las piezas de Lego, los constituyentes atómicos no se juntan solos, sino que se empujan y atraen con fuerza unos a otros, de modo que el ensamblaje de los núcleos es una tarea difícil. Los protones, en particular, tienen todos la misma carga eléctrica positiva, así que se necesita una temperatura y presión enormes para acercarlos en contra de su mutua repulsión electromagnética hasta que estén lo bastante cerca unos de otros como para que la fuerza nuclear fuerte predomine y los junte en un poderoso abrazo subatómico.

Las abrasadoras condiciones que se dieron justo después del Big Bang fueron más extremas que nada de lo que haya ocurrido en ningún lugar o tiempo desde entonces, así que puede parecer un entorno estupendo para superar la repulsión electromagnética y ensamblar núcleos atómicos. En un caldo tan extraordinariamente denso y energético de protones y neutrones en colisión, uno podría suponer que se forman de manera natural aglomeraciones de partículas que conducirían a la síntesis, átomo a átomo, de toda la tabla periódica de los elementos. De hecho, eso es lo que a finales de la década de 1940 sugirieron George Gamow (un físico soviético que en su primer intento de desertar, en 1932, pretendió atravesar el mar Negro en un kayak cargado de café y chocolate) y su estudiante de doctorado Ralph Alpher.

Tenían parte de razón. Pero enseguida se percataron de un problema, y es que al principio la temperatura del universo era demasiado elevada. El espacio estaba inundado de fotones extraordinariamente energéticos que habrían desmontado cualquier incipiente unión de protones y neutrones. Pero también comprendieron que, tan solo un minuto y medio después (un largo tiempo, si se tiene en cuenta la velocidad de vértigo a la que se desarrolló el universo primigenio), la situación ya había cambiado. Para entonces la temperatura había descendido lo suficiente como para que la energía típica de un fotón no pudiera superar a la fuerza nuclear fuerte, lo que finalmente permitió que las uniones de protones y neutrones persistieran.

Un segundo problema, que se puso de manifiesto más tarde, es que construir átomos complejos es un proceso intrincado que requiere tiempo. Necesita de una serie muy específica de pasos en la que cierto número de protones y neutrones se fusionan formando unas pellas que luego tienen que encontrarse al azar con otras pellas complementarias, fusionarse con estas, y así sucesivamente. Como en la receta de un *gourmet*, el orden en que se combinan los ingredientes resulta esencial. Y lo que hace que el proceso sea especialmente delicado es que algunas de esas pellas intermedias son inestables, lo que significa que tienden a desintegrarse al momento de formarse, estropeando las preparaciones culinarias y frenando la síntesis atómica. Este obstáculo es considerable porque, a medida que el universo se expande, su temperatura y su presión descienden de manera paulatina, lo que implica que la ventana de oportunidad para la fusión se cierra muy pronto. Más o menos diez minutos después de la creación, la temperatura y la presión caen por debajo del umbral requerido para los procesos nucleares[10].

Cuando se puso cifras a estas consideraciones, algo que comenzó a hacer Alpher en su tesis de doctorado y muchos otros investigadores han ido refinando desde entonces, se descubrió que justo después del Big Bang solo se pudieron sintetizar las primeras especies químicas. Los análisis matemáticos nos permiten calcular sus abundancias relativas: alrededor del 75 % de hidrógeno (un protón), 25 % de helio (dos protones y dos neutrones), y cantidades traza de deuterio (una forma pesada de hidrógeno, con un protón y un neutrón), helio-3 (una forma ligera de helio, con dos protones y un neutrón) y litio (tres protones y cuatro neutrones[11]). Las observaciones astronómicas detalladas de las abundancias atómicas han confirmado que estos cocientes son exactos, un triunfo de la capacidad de las matemáticas y la física para iluminar los procesos detallados que se produjeron durante los primeros minutos después del Big Bang.

¿Qué pasa entonces con los átomos más complejos, y entre ellos los esenciales para la vida? Las sugerencias sobre sus orígenes se remontan a la década de 1920. El astrónomo británico sir Arthur Eddington (a quien en una ocasión, cuando le preguntaron qué se sentía al saberse una de las tres personas que entendían la teoría de la relatividad general de Einstein, respondió con un célebre «estoy pensando en quién puede ser la tercera») dio con la idea correcta: el abrasador interior de las estrellas podía proporcionar las ollas donde lentamente se fueron cociendo especies atómicas más complejas. La propuesta pasó por las manos de muchos físicos brillantes, entre ellos el premio Nobel Hans Bethe (tuve mi primer despacho como

profesor junto al suyo, y podía poner en hora mi reloj por su absolutamente inapelable y exuberante estornudo de las cuatro de la tarde) y, quizá con mayor relevancia, las de Fred Hoyle (quien en 1949, en un programa de radio de la BBC, se refirió despectivamente a que el universo se hubiese creado en una «gran explosión» o *big bang*, acuñando así, sin quererlo, uno de los más sucintos apodos de la ciencia[12]), que es quien convirtió la sugerencia en un mecanismo físico maduro y predictivo.

En comparación con el vertiginoso ritmo de cambio justo después del Big Bang, las estrellas proporcionan medios estables que pueden persistir durante millones o miles de millones de años. La inestabilidad de determinadas «pellas» intermedias durante la fusión también frena la producción en las estrellas, pero cuando se tiene el lujo de poder matar el tiempo, se consigue acabar el trabajo. Así pues, a diferencia de la situación después del Big Bang, en las estrellas la síntesis nuclear no se acaba, ni de lejos, con la fusión de hidrógeno para formar helio. Las estrellas suficientemente masivas seguirán machacando núcleos entre sí, forzándolos a fusionarse en átomos más complejos de la tabla periódica, al tiempo que producen una considerable cantidad de luz y calor. Por ejemplo, una estrella con la masa de veinte soles se pasará los primeros ocho millones de años fusionando hidrógeno para formar helio, y luego pasará el siguiente millón de años fusionando helio para formar carbono y oxígeno. A partir de entonces, con una temperatura cada vez más alta en el núcleo, la cinta de producción no hace más que acelerarse: en unos mil años la estrella quema sus reservas de carbono, que fusiona en sodio y neón; durante los seis meses siguientes, la fusión producirá magnesio; durante un mes más, azufre y silicio; y por fin, en apenas diez días, la fusión quemará el resto de los átomos produciendo hierro[13].

Nos paramos en el hierro por una buena razón. De todas las especies atómicas, los protones y neutrones del hierro están unidos de forma especialmente fuerte. Y eso importa. Si intentamos construir especies atómicas todavía más pesadas apretujando en su núcleo más protones y neutrones, descubrimos que los núcleos de hierro no muestran demasiado interés en participar. El fortísimo abrazo nuclear que une los veintiséis protones y treinta neutrones del hierro ya ha exprimido y liberado tanta energía como es físicamente posible. Para añadir protones y neutrones haría falta una entrada (no salida) neta de energía. En consecuencia, al llegar al hierro se frena en seco la ordenada producción estelar de átomos cada vez mayores y más complejos con la simultánea liberación de luz y calor. Cual ceniza que cae al suelo del hogar, el hierro no puede quemarse más.

Pero ¿qué pasa con todas las especies atómicas con núcleo más grande, entre las que se cuentan elementos útiles como el cobre, el mercurio y el níquel, y algunos de los más sentimentales, como la plata, el oro y el platino, o exóticos pesos pesados como el radio, el uranio y el plutonio?

Los científicos han identificado dos fuentes de estos elementos. Cuando el núcleo de una estrella está formado casi enteramente por hierro, las reacciones de fusión ya no pueden generar la energía y presión necesarias para contrarrestar el tirón de la gravedad, y la estrella comienza a colapsarse. Si la estrella es lo bastante masiva, este colapso se acelera en una implosión tan potente que la temperatura del núcleo se dispara; el material implosionado rebota en el núcleo y desencadena una espectacular onda de choque que se hincha hacia fuera. A medida que esta onda ruge desde el núcleo hacia la superficie de la estrella, comprime los núcleos atómicos que encuentra a su paso con tal furia que consigue formar un montón de grandes pellas nucleares. En el torbellino de caóticos movimientos de partículas pueden sintetizarse todos los elementos de la tabla periódica, y cuando la onda de choque alcanza por fin la superficie de la estrella, lanza con fuerza al espacio todo aquel rico batiburrillo atómico.

Una segunda fuente de elementos pesados se encuentra en las violentas colisiones entre estrellas de neutrones, unos cuerpos celestes que se forman en los últimos estertores de las estrellas que tienen una masa de unas diez a treinta veces mayor que la del Sol. Que las estrellas de neutrones estén hechas fundamentalmente de neutrones, que son unas partículas camaleónicas que pueden transformarse en protones, es un buen punto de partida para construir núcleos atómicos por la profusión de materia prima. Pero hay un obstáculo, y es que para formar estos últimos los neutrones tienen que liberarse del poderoso agarre gravitacional de la estrella. Aquí es donde viene bien una colisión entre estrellas de neutrones. El impacto puede lanzar al espacio chorros de neutrones que, como no tienen carga eléctrica y, por lo tanto, no experimentan repulsión electromagnética, se unen más fácilmente en grupos. Después de que algunos de esos neutrones accionen el interruptor camaleónico y se conviertan en protones (liberando de paso electrones y antineutrinos), conseguimos una panoplia de átomos atómicos complejos. En 2017, las colisiones entre estrellas de neutrones dejaron de ser un juguete de la teoría para convertirse en un hecho empírico cuando unos científicos detectaron las ondas gravitacionales que generan estas explosiones (poco después de que se descubrieran por primera vez ondas gravitacionales, producidas por la colisión de dos agujeros negros). Una oleada de análisis ha

determinado que las colisiones entre estrellas de neutrones producen elementos pesados con más eficiencia y en mayor abundancia que las explosiones de supernovas, y bien pudiera ser que la mayoría de los elementos pesados del universo fuesen fruto de estos violentísimos choques astrofísicos.

Fusionadas en estrellas y lanzadas al espacio en explosiones de supernovas, o eyectadas en colisiones estelares y amalgamadas en chorros de partículas, un gran surtido de especies atómicas flota por el espacio, donde se juntan en torbellinos hasta formar grandes nubes de gas, que con el tiempo se congregan de nuevo en estrellas y planetas, y por fin en nosotros mismos. Tal es el origen de los ingredientes que constituyen todo lo que conocemos.

El origen del sistema solar

Con una edad de poco más de cuatro mil quinientos millones de años, el Sol es un recién llegado al cosmos. No pertenece a la primera generación de estrellas del universo. Vimos en el capítulo 3 que aquellas primeras estrellas se originaron en las variaciones cuánticas en la densidad de la materia y la energía que la expansión inflacionaria estiró por el espacio. Las simulaciones numéricas de estos procesos ponen de manifiesto que las primeras estrellas se encendieron unos cien millones de años después del Big Bang, y su entrada en la escena cósmica fue de todo menos refinada. Las primeras estrellas eran como mamuts, con una masa cientos o quizá miles de veces la del Sol, y quemaban con tal intensidad que no tardaron en morir. Las más pesadas acabaron sus vidas en una implosión gravitacional tan enfática que se colapsaron formando agujeros negros, unas configuraciones extremas de la materia de las que nos ocuparemos más adelante en nuestro viaje. Las estrellas menos masivas acabaron sus vidas con feroces explosiones de supernova que, además de sembrar el espacio de átomos complejos, iniciaron la siguiente ronda de formación estelar. Del mismo modo que la onda de choque de una supernova desgarra estrellas y fuerza la fusión de sus constituyentes atómicos, también la onda de choque, al moverse por el espacio, comprime las nubes de ingredientes moleculares que encuentra a su paso. Y como las regiones comprimidas son más densas, ejercen un mayor tirón gravitatorio sobre su entorno, atraen para sí más constituyentes

particulados y desatan una nueva ronda de *crescendo* gravitacional que finalmente produce la nueva generación de estrellas.

Basándose en su composición (es decir, a partir de las cantidades de diversos elementos pesados que contiene en la actualidad, que se obtienen de mediciones espectroscópicas), los físicos solares creen que nuestro Sol es una nieta de las primeras estrellas del universo, un descendiente de tercera generación. Pero hay mucha incertidumbre acerca de dónde se formó inicialmente. Una posibilidad que se ha investigado es una región que se conoce como Messier 67, a unos tres mil años luz de distancia, que contiene un grupo de estrellas de composición química parecida a la del Sol, una similitud que sugiere un parentesco. El reto, todavía sin resolver, es explicar cómo se habría eyectado el Sol y los planetas del sistema solar (o el disco protoplanetario a partir del cual se formarían después los planetas) desde un lugar de formación tan lejano hasta su posición actual. Algunos estudios de las posibles trayectorias llegan a la conclusión de que no hay manera de que Messier 67 fuese el lugar de nacimiento del Sol, mientras que otros, apelando a la modificación de varias suposiciones, producen resultados más esperanzadores[14].

Lo que sí podemos decir con más confianza es que hace unos 4700 millones de años la onda de choque de una supernova debió atravesar una nube que contenía hidrógeno, helio y pequeñas cantidades de átomos más complejos, comprimiendo parte de esta que, al ser ahora más densa que su entorno, ejerció un tirón gravitacional más fuerte y comenzó a atraer materia hacia su interior. Durante varios cientos de millones de años, esta región de la nube de gas siguió contrayéndose, girando lentamente al principio, luego más deprisa, como una elegante patinadora que acerca los brazos al cuerpo mientras da vueltas. Y del mismo modo que la patinadora al girar experimenta una fuerza hacia fuera (la que levanta los flecos de su vestido), también la nube esparció y aplanó sus regiones exteriores hasta formar un disco en rotación que rodeaba en su centro una región esférica de menor tamaño. Durante los siguientes cincuenta a cien millones de años, la nube de gas realizó una lenta y paulatina representación del paso a dos de la entropía que comentamos en el capítulo 3. La fuerza gravitatoria fue comprimiendo el núcleo esférico, que se fue haciendo más denso y caliente, al tiempo que el material circundante se tornaba menos denso y se enfriaba. La entropía del núcleo disminuyó, pero la de su entorno aumentó en una cantidad todavía mayor. Hasta que, finalmente, la temperatura y la densidad del núcleo traspasaron el umbral de ignición de la fusión nuclear.

Y nació el Sol.

Durante varios millones de años, los restos de material que dejó la formación del Sol (en porcentaje, apenas unas décimas del disco giratorio original), se fueron juntando a través de numerosos casos de *crescendo* gravitacional hasta formar los planetas del sistema solar. Las sustancias más ligeras y volátiles (hidrógeno y helio, pero también metano, amoníaco y agua), que se habrían visto afectadas por una radiación solar intensa, se acumularon con mayor abundancia en las regiones más exteriores y frías del sistema solar, dando origen a los gigantes gaseosos: Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno. Los constituyentes más pesados y robustos, como el hierro, el níquel y el aluminio, que resistían mejor las ardientes condiciones cerca del Sol, se consolidaron formado los pequeños planetas rocosos interiores: Mercurio, Venus, Tierra y Marte. Al ser mucho menos masivos que el Sol, los planetas consiguen aguantar su propio y modesto peso gracias a la resistencia a la compresión intrínseca de sus propios átomos. En el núcleo de estos planeta aumentan la temperatura y la presión, pero muy lejos todavía de los niveles necesarios para que se encienda la fusión nuclear, y de ahí los ambientes comparativamente templados con los que la vida (la nuestra, sin duda, y posiblemente toda la del universo) tiene una gran deuda de gratitud.

Nuestro joven planeta

Los primeros quinientos mil años de vida de la Tierra se conocen como «eón hádico», por referencia al dios griego del inframundo, para connotar una era de furiosos volcanes, lavas ardientes y densos y agresivos humos de azufre y cianuro. Pero algunos científicos comienzan a sospechar que como portaestandarte de la joven Tierra, tal vez Poseidón habría sido una elección más acertada. Los cambios en los océanos, que todavía se discuten, se apoyan en indicios no más sustanciales que unas motas de polvo. Aunque no tenemos muestras de rocas de una era tan antigua, los investigadores han identificado unas motas translúcidas, llamadas «cristales de zircón», que se formaron cuando la lava fundida de la Tierra primigenia se enfrió y solidificó. Estos cristales son esenciales para entender la evolución de la Tierra primigenia, porque no solo son prácticamente indestructibles, habiendo resistido miles de millones de años de maltrato geológico, sino que además actúan como

diminutas cápsulas del tiempo. Durante su formación, los cristales de zircón atrapan muestras moleculares de su entorno a las que podemos poner fecha con la ayuda de las técnicas habituales de datación radiactiva. Así pues, el análisis meticuloso de las impurezas de los cristales de zircón nos brinda una muestra de las condiciones que reinaban en la Tierra arcaica.

Un hallazgo en Australia occidental nos ha proporcionado cristales de zircón datados en 4400 millones de años, apenas un par de cientos de millones de años después de la formación de la Tierra y el sistema solar. Un análisis detallado de su composición ha permitido a los investigadores sugerir que en aquellos tiempos las condiciones tal vez fuesen más gratas de lo que creíamos hasta ahora. Nuestro joven planeta podría haber sido un calmado mundo acuoso en el que unas pequeñas masas de tierra salpicaban una superficie cubierta de océano[15].

Eso no quiere decir que la historia de la Tierra no tuviese sus momentos de drama. Es probable que, entre unos cincuenta y cien millones de años después de su formación, la Tierra colisionó con un planeta del tamaño de Marte llamado Tea. El choque habría vaporizado la corteza de nuestro planeta, destruido Tea y lanzado una nube de polvo y gas a miles de kilómetros por el espacio. Con el tiempo, esa nube se habría ido agregando gravitacionalmente hasta formar la Luna, que es uno de los satélites planetarios más grandes del sistema solar y cada noche nos recuerda aquel violento encontronazo. También las estaciones nos lo recuerdan. Si experimentamos veranos cálidos e inviernos fríos es porque el eje inclinado de la Tierra afecta el ángulo con el que nos llega la radiación solar, de manera que en el verano los rayos llegan rectos, mientras que en invierno entran con un ángulo oblicuo. El impacto con Tea es la causa probable de la inclinación de nuestro planeta. Y aunque menos sensacional que una colisión planetaria, tanto la Tierra como la Luna fueron aporreados en más de una ocasión por meteoros de menor tamaño. En nuestro satélite, la falta de vientos que erosionen la superficie y su corteza estática han preservado las cicatrices, pero el aporreamiento de la Tierra, aunque ahora no sea tan visible, fue igual de severo. Algunos de los primeros impactos podrían haber vaporizado parcial o totalmente toda el agua de la superficie del planeta. Pese a ello, los archivos de zircón nos dicen que en el curso de unos pocos cientos de millones de años después de su formación, la Tierra se podría haber enfriado lo suficiente como para que el vapor de la atmósfera cayese en forma de lluvia, llenase los océanos y configurase una superficie de aspecto no muy distinto del que

conocemos hoy. Al menos, esa es una de las conclusiones que se siguen de la lectura de los cristales.

La duración necesaria para que la Tierra se enfriase y contuviese agua en abundancia, quizá cientos de millones de años, quizá mucho más, es algo que se debate intensamente porque concierne de manera muy directa a la pregunta de en qué momento, en la historia geológica, apareció la vida. Aunque decir que donde hay agua hay vida es decir demasiado, sí podemos afirmar con confianza que si no hay agua líquida, no hay vida, al menos no del tipo de vida que conocemos.

Veamos por qué.

Vida, física cuántica y agua

El agua es una de las sustancias más familiares de la naturaleza, pero también de las más importantes. Su composición molecular, H_2O, es para la química lo que la ecuación de Einstein, $E = mc^2$, es para la física: la fórmula más célebre de la disciplina. Si la examinamos a fondo, podremos entender las peculiares propiedades del agua y desarrollar algunas de las ideas clave del programa de Schrödinger para comprender la vida al nivel de la física y la química.

A mediados de la década de 1920, muchos de los principales físicos del mundo comenzaron a notar que el orden aceptado estaba a punto de sufrir una alteración radical. Las ideas newtonianas, cuyas predicciones del movimiento de los planetas por sus órbitas y de las trayectorias de las rocas por el aire habían sido durante siglos el referente de la precisión, fracasaban miserablemente cuando se las aplicaba a partículas diminutas, como los electrones. A medida que los datos rebeldes emergían como burbujas del micromundo, los calmados mares del modelo newtoniano se embravecían. Los físicos no tardaron en vérselas y deseárselas solo para mantenerse a flote. El lamento de Werner Heisenberg, que musitó mientras paseaba sin rumbo por un parque vacío de Copenhague tras una extenuante noche de cálculos con Niels Borh, resumía bien la situación: «¿Es posible que la naturaleza sea tan absurda como se nos muestra en los experimentos con átomos?»[16]. La respuesta, un rotundo sí, llegó en 1926 de la mano de un modesto físico alemán, Max Born, que acabó con el atasco conceptual al introducir un

paradigma cuántico radicalmente nuevo. Lo que Born argumentó fue que un electrón (o cualquier otra partícula) solo puede describirse en función de la «probabilidad» de que se encuentre en un lugar determinado. De un plumazo, el familiar mundo newtoniano en el que los objetos siempre ocupan posiciones definidas dio paso a una realidad cuántica en la que una partícula podía estar aquí o allí o en cualquier otro lugar. Y, lejos de fracasar, la incertidumbre inherente a un esquema probabilístico reveló una característica intrínseca de la realidad cuántica que hasta entonces había pasado por alto el marco newtoniano, un marco conceptual que, por penetrante que fuese, ahora se demostraba insuficiente. Newton había basado sus ecuaciones en el mundo que podía ver. Un par de siglos más tarde, descubrimos que hay una realidad inesperada fuera del alcance de nuestras débiles percepciones humanas.

La propuesta de Born llegó acompañada de precisión matemática[17]. Explicó que las probabilidades cuánticas se podían predecir con una ecuación que Schrödinger había publicado unos meses antes. Aquello fue una novedad para todos, incluso para el propio Schrödinger. Pero como científicos, siguieron las indicaciones de Born y comprobaron que las matemáticas funcionaban. Y de manera espectacular. Datos que antes solo se podían explicar mediante reglas empíricas *ad hoc*, o que se habían resistido completamente a una explicación, podían entenderse por fin mediante análisis matemáticos sistemáticos.

Aplicada a los átomos, la perspectiva cuántica arrumba con el viejo «modelo de sistema solar» que imaginaba los electrones en órbita alrededor del núcleo igual que planetas en órbita alrededor del Sol. En su lugar, la mecánica cuántica concibe el electrón como una nube desdibujada en torno al núcleo, de tal manera que su densidad en cada punto indica la probabilidad de encontrarlo. Allí donde la nube de probabilidad es muy tenue, es muy poco probable encontrar el electrón, mientras que es probable encontrarlo allí donde la nube es más densa.

La ecuación de Schrödinger hace matemáticamente explícita esta descripción matemática, puesto que determina la forma y perfil de densidad de la nube de probabilidad de un electrón al tiempo que estipula de forma precisa, y eso es lo importante para nuestra discusión, cuántos de los electrones de un átomo caben en cada una de esas nubes[18]. Los detalles enseguida se tornan técnicos, pero para comprender sus características fundamentales, basta con imaginar que el núcleo de un átomo es el escenario central de un teatro y los electrones son el público que presencia la acción desde sus asientos, dispuestos en filas alrededor del escenario. En este «teatro

cuántico», la matemática de Schrödinger aplicada a los átomos dicta de qué manera deben los electrones ocupar los asientos del público.

Tal como uno esperaría a partir de la experiencia de subir las escaleras de un teatro de verdad, cuanto más arriba se encuentra la fila, más energía necesita un electrón para alcanzarla. Así pues, cuando un átomo está tan tranquilo como pueda estar, en su configuración de menor energía, sus electrones conformarán el más ordenado de los públicos, poblando una fila superior solo si las inferiores ya están ocupadas. Si el electrón se encuentra en su estado de mínima energía, ningún electrón sube más arriba de lo absolutamente necesario. ¿Cuántos electrones caben en una fila? La matemática de Schrödinger nos da la respuesta, una suerte de normativa de incendios universal que se aplica a todos los teatros cuánticos: en la primera fila caben, a lo sumo, dos electrones, ocho en la segunda, dieciocho en la tercera, y así de manera sucesiva, de acuerdo con lo que especifica la ecuación. Si se incrementa la energía de un átomo, por ejemplo con un potente láser, algunos de sus electrones podrían agitarse lo bastante como para saltar a una fila más alta, pero esa exuberancia no dura mucho. Los electrones excitados no tardan en caer de nuevo en su fila original, emitiendo energía (que llevan fotones) al tiempo que el átomo retorna a su configuración más tranquila[19].

La matemática también revela otra peculiaridad, una suerte de TOC atómico que resulta ser uno de los principales motores de las reacciones químicas en todo el cosmos. Los átomos sienten aversión por las filas medio llenas. ¿Hay filas vacías? No hay problema. ¿Están llenas? Tampoco. Pero ¿medio llenas? Eso hace que los electrones se suban por las paredes. Algunos átomos tienen suerte, y poseen el número justo de electrones para conseguir un aforo completo por sí solos. El helio tiene dos electrones que equilibran la carga eléctrica de sus dos protones, así que llenan felizmente la primera fila. El neón tiene diez electrones que equilibran la carga eléctrica de sus diez protones, y también completan felizmente la primera fila, donde caben dos, y la segunda fila, donde caben los otros ocho. Pero en la mayoría de los átomos, el número de electrones necesario para compensar el número de protones no llena filas completas[20].

¿Qué ocurre entonces?

Negocian con otras especies atómicas. Si un átomo tiene una fila superior que necesita dos electrones más y otro átomo tiene una fila superior ocupada por solo dos electrones, entonces si la segunda le dona dos electrones a la primera las dos consiguen calmar su inquietud por tener filas completas. Es

importante darse cuenta de que, al aceptar dos electrones, el primer átomo adquiere una carga neta negativa, mientras que el segundo, que los dona, queda con una carga neta positiva, y como las cargas opuestas se atraen, los dos átomos se juntan formando una molécula eléctricamente neutra. De manera alternativa, si por ejemplo dos átomos necesitan un electrón más para llenar la fila más alta, pueden llegar a un acuerdo distinto: cada uno de ellos puede donar un electrón a un par compartido, y de este modo también calman la comezón de tener una fila sin completar y, gracias al lazo que crean los átomos compartidos, pueden combinarse también para formar una molécula eléctricamente neutra. Es a estos procesos que llenan las filas de los electrones mediante el enlace de átomos a lo que nos referimos cuando hablamos de reacciones químicas. Son los procesos que guían esas reacciones aquí en la Tierra, dentro de los seres vivos, y en todo el universo.

El agua es un caso de especial importancia. El oxígeno contiene ocho electrones, dos en la primera fila y seis en la segunda. Así pues, se muere de ganas por conseguir dos electrones más para llenar la segunda fila con el máximo que permite, que son ocho. El hidrógeno es una fuente abundante donde conseguir esos electrones. Cada átomo de hidrógeno contiene un solo electrón, que se sienta solo, cruzado de brazos, en la primera fila. Si un átomo de hidrógeno ve la ocasión de completar esa fila con un electrón más, lo hará de buen gusto. Así que el hidrógeno y el oxígeno llegan a un acuerdo para compartir un par de electrones, satisfaciendo así del todo al hidrógeno y llevando al oxígeno a solo un electrón de la felicidad orbital. Si incluimos un segundo átomo de hidrógeno que comparte del mismo modo un par de electrones con el oxígeno, la dicha es absoluta. Esos electrones compartidos unen el átomo de oxígeno con los dos átomos de hidrógeno, dando lugar así a una molécula de agua, H_2O.

La geometría de esta unión tiene implicaciones de largo alcance. Los empujes y tirones entre átomos llevan a todas las moléculas de agua a adoptar una forma de «V», con el oxígeno en el vértice y cada uno de los hidrógenos colgando de una de las puntas de la letra. El H_2O no tiene carga eléctrica, pero el oxígeno es tan maniático con el llenado de sus capas orbitales que acapara los electrones compartidos, con el resultado de que la carga eléctrica de la molécula queda distribuida de forma irregular. El vértice de la molécula, donde se encuentra el oxígeno, queda con carga neta negativa, mientras que las dos puntas superiores, donde están los hidrógenos, quedan con carga neta positiva.

La distribución de la carga eléctrica en la molécula de agua puede parecer un detalle esotérico. Pero no lo es. Resulta ser esencial para el origen de la vida. Gracias a la distribución sesgada de su carga eléctrica, el agua puede disolver casi todo. Los vértices de carga negativa, donde está el oxígeno, se agarran a todo lo que tengan la más mínima carga positiva, mientras que las puntas de hidrógeno, de carga positiva, se agarran a todo lo que tenga la más ligera carga negativa. En tándem, los dos extremos de la molécula de agua actúan como unas garras cargadas eléctricamente que mantienen separado casi todo lo que se sumerja en agua el tiempo suficiente.

La sal de mesa es el ejemplo más familiar. Compuesta de un átomo de sodio unido a un átomo de cloro, una molécula de sal de mesa posee una ligera carga positiva cerca del sodio (que dona un electrón al cloro) y una carga ligeramente negativa cerca del cloro (que acepta un electrón del sodio). Si tiramos sal en el agua, la parte del oxígeno del H_2O (que tiene carga negativa) agarra el sodio (de carga positiva), mientras que el lado del hidrógeno del H_2O (que tiene carga positiva) agarra el cloro (de carga negativa), desgarrando las moléculas de la sal y disolviéndolas en una solución. Y lo que es cierto para la sal también lo es para muchas otras sustancias. Los detalles varían, pero la distribución asimétrica de la carga en el agua hace que esta sea un magnífico solvente. Cuando nos lavamos las manos, aunque sea sin jabón, la polaridad eléctrica del agua trabaja a destajo para disolver cualquier sustancia extraña y llevársela con ella.

Más allá de su utilidad para la higiene personal, la capacidad del agua para agarrar e ingerir sustancias es indispensable para la vida. El interior de las células es como un laboratorio químico en miniatura que para funcionar necesita mover con rapidez una gran colección de ingredientes: nutrientes que entran, desechos que salen, compuestos químicos que deben mezclarse para sintetizar sustancias necesarias para el funcionamiento de la célula, y tantas otras cosas. El agua hace que todo eso sea posible. Constituye alrededor del 70 % de la masa de la célula, y es para la vida el fluido de transporte. El premio Nobel Albert Szent-Györgyi lo resumió con elocuencia:

> El agua es la materia y la matriz de la vida, la madre y el medio. No hay vida sin agua. La vida solo consiguió salir del océano cuando aprendió a ponerse una piel, una bolsa en la que llevar agua. Todavía vivimos en el agua, solo que ahora la llevamos dentro[21].

Como poesía, es una elegante oda al agua y la vida. Como ciencia, todavía no podemos establecer la validez universal de esta aserción, pero tampoco conocemos ninguna forma de vida que ponga en entredicho la necesidad de agua.

La unidad de la vida

Habiendo repasado la síntesis de átomos simples y complejos, el origen del Sol y la Tierra, la naturaleza de las reacciones químicas y la necesidad de agua, ya estamos preparados para centrarnos en la vida. Aunque pueda parecer natural comenzar por su génesis, esta cuestión, todavía no resuelta, es mejor abordarla después de explorar las cualidades moleculares por excelencia de la propia vida. Y para alguien como yo, que ha pasado los últimos treinta años persiguiendo una teoría unificada de las fuerzas fundamentales de la naturaleza, esa exploración revela una sorprendente unidad biológica. No conocemos el número exacto de especies distintas que hay en la Tierra, de microbios a manatíes, pero los estudios ofrecen estimaciones que se mueven desde millones, por lo bajo, hasta billones, en las estimaciones más altas. Sea cual sea el número exacto, está claro que es enorme. Pero toda esa riqueza de especies distintas no nos deja ver la naturaleza singular del funcionamiento interno de la vida.

Si examinamos un tejido vivo con la suficiente ampliación, encontramos los «cuantos» de la vida, las células, que son las unidades más pequeñas de los tejidos que podemos identificar como algo vivo. Con independencia de su procedencia, son tantas las características que todas comparten que a una persona no entrenada que examine especímenes individuales le resultaría difícil distinguir un ratón de un mastín, una tortuga de una tarántula o una mosca de un humano. Eso es más que notable. Uno creería que en nuestras células debe verse alguna marca obvia y significativa. Pero no es así. La razón, establecida durante las últimas décadas, es que toda la vida pluricelular compleja desciende de la misma especie unicelular ancestral. Las células se parecen porque sus linajes irradian desde el mismo punto de partida[22].

Eso es muy revelador. Con tan copiosas encarnaciones, la vida podría haber tenido múltiples orígenes. Al seguir el linaje de los moluscos marinos y remontarnos a su origen, podríamos haber encontrado que este es distinto del

que encontramos en los wombats o las orquídeas. Pero los datos nos dicen con rotundidad que cuando se busca el origen de la vida, los linajes convergen en un antepasado común. Y hay dos características omnipresentes en la vida que nos convencen todavía más. Ambas ilustran lo hondo que es lo que comparten todas las vidas. La primera, y más familiar, tiene que ver con la «información», con el modo en que las células codifican y utilizan la información que dirige las funciones que sustentan la vida. La segunda, igual de importante pero menos célebre, se refiere a la «energía», a cómo las células aprovechan, almacenan y utilizan la energía necesaria para llevar a cabo las funciones que sustentan la vida. En ambos casos veremos cómo en toda la extraordinaria diversidad de la vida en la Tierra los detalles de los procesos son idénticos.

La unidad de la información en la vida

Una de las formas que tenemos de reconocer que un conejo está vivo es observando cómo se mueve. Una piedra también se mueve, naturalmente. Una fuerte corriente puede trasladarla río abajo o una erupción puede lanzarla al cielo. La diferencia es que el movimiento de la piedra se puede entender, incluso predecir, a partir de las fuerzas externas que actúan sobre ella. Si conocemos lo suficiente sobre el río o la erupción, seremos capaces de anticipar bastante bien lo que ocurrirá. Predecir el movimiento de un conejo no es tan fácil. La actividad dentro de lo que Schrödinger llamó «límites espaciales» del conejo (su actividad interna) es un factor decisivo para su locomoción. El conejo arruga el hocico, gira la cabeza, golpea el suelo con la pata, y todo ello hace que parezca tener voluntad propia. Que el conejo o cualquier otra forma de vida (incluidos nosotros) gocen de verdad de una voluntad autónoma es algo que se ha debatido durante siglos, pero nos ocuparemos de ello en el capítulo siguiente, así que no hay razón para que nos entorpezca ahora. Por el momento, podemos estar de acuerdo en que, si bien la actividad dentro de la piedra no tiene la menor relevancia para el movimiento que observamos, los movimientos coordinados, complejos y autodirigidos del conejo nos dejan ver que está vivo.

No es una prueba infalible. Los sistemas automáticos pueden ejecutar movimientos bastante parecidos, y a media que la tecnología avance, la

capacidad de emular la vida será cada vez mayor. Pero eso solo nos lleva a subrayar la cuestión general que estamos discutiendo: el movimiento del tipo que estamos considerando surge de la interacción entre información y ejecución, entre lo que podríamos calificar de programa y máquina, de *software* y *hardware*. Para un sistema automático, la descripción es literal. Los drones, los coches autónomos, los robots aspiradores y demás artilugios están gobernados por programas que toman datos de su entorno como entradas, y sus salidas determinan una respuesta ejecutada por la maquinaria del aparato, ya sean alas, rotores o ruedas. En el caso de un conejo, la descripción es metafórica. Aun así, el paradigma de programa-máquina resulta ser especialmente útil para pensar sobre la vida. El conejo acumula datos sensoriales de su entorno, los hace pasar por una «computadora neuronal» (su cerebro), y esta envía señales cargadas de información por las vías nerviosas (come hierba, salta por encima de la rama caída, etc.) que generan acciones físicas. El movimiento del conejo surge del procesamiento y transmisión internos de una compleja serie de instrucciones que fluyen a través de su estructura física: un *software* biológico que rige un *hardware* también biológico. Este tipo de procesos no se hallan en absoluto en la piedra.

Si nos introducimos en una sola célula del conejo, encontramos que esas mismas ideas nos valen, pero a una escala menor. La mayor parte de las funciones de la célula están ejecutadas por proteínas, unas moléculas grandes que catalizan y regulan reacciones químicas, transportan sustancias esenciales y controlan propiedades específicas, como la forma de la célula o su movimiento. Las proteínas están constituidas por combinaciones de veinte subunidades menores, los «aminoácidos», de modo parecido a como las palabras están formadas por diversas combinaciones de veintisiete letras. Y del mismo modo que las palabras con sentido requieren que las letras se ordenen de manera específica, las proteínas útiles requieren que los aminoácidos se unan en secuencias concretas. Si ese ensamblaje se encomendase al azar, las probabilidades de que los aminoácidos requeridos se encontrasen unos con otros en el orden justo para construir una proteína determinada serían casi cero. El ingente número de maneras posibles en que se pueden combinar veinte aminoácidos distintos en una larga cadena lo deja bien claro: para una cadena de ciento cincuenta aminoácidos (una proteína pequeña), hay unas 10^{195} ordenaciones distintas, un número que supera en mucho el de partículas en todo el universo observable. De modo muy parecido a como el proverbial equipo de monos que teclean letras al azar

durante décadas no conseguirá escribir más que «ser o no ser», el azar ciego no conseguiría crear las proteínas específicas que requiere la vida.

En realidad, la síntesis de proteínas complejas requiere un conjunto de instrucciones que definen el proceso paso a paso: une este aminoácido a este otro, luego añade uno más, seguido de aquel otro, y así sucesivamente. Dicho de otro modo, la síntesis de proteínas requiere de un *software* celular. Y esas instrucciones existen dentro de cada célula. Están codificadas en el ADN, la molécula de la vida, cuya estructura geométrica descubrieron Watson y Crick.

Cada molécula de ADN está configurada en la famosa espiral de la doble hélice, una larga escalera retorcida cuyos peldaños están formados por travesaños formados por parejas de unas moléculas más cortas, llamadas bases, que se suelen denotar con las letras A, T, G y C (los nombres técnicos, que no importan aquí, son adenina, tirosina, guanina y citosina). Los miembros de una especie determinada comparten de forma muy precisa la misma secuencia de letras. En el caso de los humanos, la secuencia de ADN alcanza unos tres mil millones de letras, y la secuencia de cualquiera de nosotros difiere de la de Einstein, Marie Curie, William Shakespeare o cualquier otro en menos de una cuarta parte de un 1 %, aproximadamente una letra de cada quinientas[23]. Pero antes de vanagloriarnos por poseer un genoma tan parecido al de cualquiera de las más brillantes mentes de la historia (o de cualquiera de los más infames villanos), conviene saber que nuestra secuencia de ADN también coincide en un 99 % con la de cualquier chimpancé[24]. Diferencias genéticas pequeñas pueden tener un impacto muy grande.

Al construir los peldaños de la escalera de ADN, las bases se juntan por parejas de acuerdo con una regla rígida: una A en uno de los largueros forma un travesaño uniéndose a una T en el otro larguero, una G en un lado se une a una C en el otro. De este modo, la secuencia de bases de uno de los largueros de la escalera determina la secuencia de bases en el otro larguero. Y es en la secuencia de letras donde encontramos, entre otra información vital para la célula, instrucciones que especifican qué aminoácidos se unirán a qué otros, dirigiendo así la síntesis de la colección de proteínas que en cada especie son esenciales para esa forma de vida.

«Todos los seres vivos codifican las instrucciones para fabricar las proteínas del mismo modo»[25].

En un solo párrafo, tal vez demasiado detallado, se puede resumir el manual de funcionamiento del código Morse que está escrito en la vida. Los grupos de tres letras consecutivas de una hebra determinada de ADN denotan

un aminoácido particular de la colección de veinte[26]. Por ejemplo, la secuencia CTA denota el aminoácido leucina; la secuencia GCT, la alanina; la secuencia GTT, la valina, y así sucesivamente. Si examinamos las bases unidas a uno de los largueros de una secuencia de ADN y nos fijamos en la secuencia de nueve letras CTAGCTGTT, lo que leemos son instrucciones para unir una leucina (las primeras tres letras, CTA) a una alanina (el segundo grupo de tres letras, GCT), a la que luego añadiríamos una molécula de valina (las últimas tres letras, GTT). Una proteína formada por mil aminoácidos estará codificada por una secuencia específica de tres mil letras (el punto de inicio y fin de esa secuencia también estarían codificados por secuencias específicas de tres letras, de modo parecido a como una letra mayúscula y un punto denotan el principio y el final de esta frase). Una secuencia como la descrita constituye un «gen», el plano de instrucciones para ensamblar una proteína[27].

He expuesto los detalles por dos razones. La primera es que ver el código hace que el concepto de *software* celular sea explícito. Dado un segmento de ADN, podemos leer las instrucciones que dirigen el funcionamiento interno de la célula, una sofisticada coordinación totalmente ausente en la materia inanimada. La segunda es que ver el código demuestra lo que quieren decir los biólogos cuando lo califican de universal. Toda molécula de ADN, sea de Sófocles o sea de un sargazo, codifica del mismo modo la información necesaria para fabricar las proteínas.

Esa es la unidad de la información en la vida.

La unidad de la energía en la vida

Del mismo modo que la máquina de vapor necesita un suministro de energía para empujar una y otra vez el pistón, la vida requiere un abastecimiento constante de energía para llevar a cabo funciones esenciales, desde el crecimiento y la reparación al movimiento y la reproducción. En el caso del artefacto, la energía se extrae del entorno: quemamos carbón, madera y otros combustibles variados, y el calor que se genera es consumido por el mecanismo interno de la máquina, que lleva a la expansión del vapor de agua. Los seres vivos también consiguen energía de su entorno. Los animales la extraen de los alimentos; las plantas, de la radiación solar. Pero a diferencia

de la máquina de vapor, la vida no suele usar esa energía en el momento de adquirirla. Los procesos de la vida, más complejos que la expansión o contracción del vapor de agua, requieren un sistema más refinado de transporte y distribución de energía. La vida necesita almacenar la energía que extrae del combustible para poder entregarla de manera regular y fiable a medida que la requieran sus constituyentes celulares.

«Todos los seres vivos resuelven del mismo modo el problema de la extracción y distribución de la energía»[28].

La solución universal que ha alcanzado la vida, una compleja secuencia de procesos que tienen lugar en este mismo momento en cualquiera de nosotros y, por lo que sabemos, en todo lo que vive, se cuenta entre los logros más espectaculares de la naturaleza. La vida extrae energía de su entorno mediante una suerte de lenta combustión química, y la almacena cargando unas baterías biológicas que poseen todas las células. Estos paquetes de baterías celulares proveen después una fuente constante de electricidad que las células utilizan para sintetizar moléculas que tienen el cometido de transportar y entregar energía a cada componente celular.

Eso puede parecer difícil de entender, y lo es. Pero también es vital comprenderlo, así que vamos a examinarlo brevemente. No es esencial entender todos los detalles. Aun la más superficial de las exploraciones revelará la prodigiosa manera en que la vida impulsa su funcionamiento interno.

La combustión química que ocupa un lugar central en el procesamiento de la energía en los seres vivos se conoce como «reacción redox». No es el nombre más seductor, pero el ejemplo arquetípico (la combustión de un tronco) clarifica la nomenclatura. A medida que un tronco se quema, el carbono y el hidrógeno de la madera ceden electrones al oxígeno del aire (recordemos que el oxígeno se desvive por conseguir electrones), y se unen con este formando moléculas de agua y dióxido de carbono al tiempo que liberan energía (la razón de que el fuego sea caliente). Cuando el oxígeno toma los electrones, decimos que se reduce (podemos pensar que lo que se reduce es el ansia del oxígeno por conseguir electrones). Cuando el carbono o el hidrógeno ceden electrones al oxígeno, decimos que se oxidan. En conjunto, lo que presenciamos es una reacción de reducción-oxidación o, de forma más concisa, redox.

En la actualidad, los científicos utilizan el término redox de manera más amplia para referirse al conjunto de reacciones que implican la transferencia de electrones entre constituyentes químicos, aunque el oxígeno no intervenga.

Aun así, un tronco en llamas sigue proporcionando un modelo muy relevante para describir la combustión química. Átomos famélicos, acongojados por su carga de filas medio llenas, agarran electrones de donantes atómicos con tal fuerza que en el proceso se libera una cantidad no despreciable de energía almacenada.

En las células vivas (centrémonos en los animales para ser más concretos), se producen reacciones redox parecidas, pero, y esto es importante, los electrones arrancados de los alimentos ingeridos durante el desayuno no se transfieren directamente al oxígeno. Si se hiciera así, la energía liberada provocaría algo parecido a un incendio celular, un resultado que a la vida le ha resultado conveniente evitar. En su lugar, los electrones donados por los alimentos pasan por una serie de reacciones redox intermedias, áreas de descanso en un viaje que finalmente acabará en el oxígeno, pero que permite que cada vez se libere una cantidad menor de energía. Como una pelota que alcanza las gradas y baja los escalones uno a uno hasta el estadio, los electrones saltan de un receptor molecular a otro, cada uno más ávido de electrones que el anterior, y a cada paso se libera energía. El oxígeno, que de todos los receptores es el más ávido de electrones, aguarda al electrón en la base de las gradas y, cuando por fin llega, lo agarra con fuerza, le exprime la energía marginal que aún le quede y concluye el proceso de extracción de energía.

En las plantas el proceso es básicamente el mismo. La principal diferencia es la fuente de electrones, que en los animales proceden de los alimentos, y en los vegetales, del agua. Cuando la luz del sol golpea la clorofila de las hojas verdes de las plantas, arranca electrones de moléculas de agua, los carga de energía, y entonces caen por otra cascada redox que permite extraer su energía. Así pues, la energía que sustenta todas las acciones de los seres vivos se puede atribuir, en último análisis, a un mismo proceso: electrones que, saltando, ejecutan una cadena de reacciones redox dentro de la célula. Por eso Albert Szent-Györgyi, siguiendo sus reflexiones poéticas, decía que «la vida es un electrón que busca un lugar de descanso».

Desde la perspectiva de la física, merece la pena subrayar lo sorprendente que resulta todo esto. La energía es la moneda que paga las idas y venidas en todo el cosmos, una divisa con muchos nombres y conseguida por una variedad aún mayor de medios. Una de las monedas es la energía nuclear, generada por la fisión y fusión entre un amplísimo abanico de especies atómicas; otra es la energía electromagnética, generada por atracciones y repulsiones entre una gran variedad de partículas cargadas; aún otra es la

energía gravitacional, generada por interacciones entre muy diversos cuerpos masivos. Y, sin embargo, de todos los innumerables procesos, la vida en el planeta Tierra aprovecha un solo mecanismo, solo uno: una secuencia específica de reacciones químicas electromagnéticas en la que los electrones participan en una secuencia descendiente de saltos, empezando en el alimento o el agua y acabando en el fuerte abrazo del oxígeno.

¿Cómo llegó a convertirse este proceso de extracción de energía en el mecanismo elegido por la vida? Nadie lo sabe. Pero su universalidad, como la del código genético, atestigua, y con fuerza, la unidad de la vida. ¿Por qué todos los seres vivos obtienen energía de la misma manera? La respuesta inmediata es que toda la vida debe descender de un antepasado común, una especie unicelular que los investigadores creen que existió hace unos cuatro mil millones de años.

Biología y baterías

Las pruebas a favor de la unidad de la vida se tornan aún más convincentes cuando le seguimos la pista a la energía liberada por el salto de electrones a lo largo de una cadena de reacciones redox. Esa energía se utiliza para cargar baterías celulares presentes en todas las células. Estas baterías, a su vez, alimentan la síntesis de moléculas especialmente útiles para el transporte y entrega de energía en el lugar y el momento en que se necesite dentro de una célula. Se trata de un proceso complejo. Pero es el mismo en todos los seres vivos.

A grandes rasgos, funciona del siguiente modo. A medida que un electrón salta a los brazos abiertos de un receptor redox, la molécula de este se estremece y modifica su orientación con relación a otras moléculas que se encuentran estrechamente empaquetadas a su alrededor, de modo parecido a como en un motor se cambia de marcha. Cuando el veleidoso electrón salta de nuevo hasta el siguiente receptor redox, la primera molécula retorna a su orientación original al tiempo que la nueva molécula receptora se estremece. A medida que el electrón va saltando, la pauta se repite: las moléculas se estremecen, cambian de orientación, pierden el electrón, se estremecen de nuevo y vuelven a su orientación original.

Esta secuencia de saltos de electrones que producen los estremecimientos moleculares realiza un trabajo sutil pero importante. Cada vez que las moléculas cambian de orientación y regresan a la original, empujan a un grupo de protones, que se ven obligados a atravesar una membrana circundante, y se van acumulando en un delgado compartimento, una especie de celda de detención abarrotada. O, en un lenguaje más prosaico, una batería de protones.

En una batería normal, las reacciones químicas fuerzan a los electrones a acumularse en uno de los lados de la batería (el ánodo), donde la repulsión mutua entre estas partículas de igual carga hace que estén dispuestos a escapar a la primera de cambio. Cuando al presionar un botón de encendido o accionar un interruptor cerramos un circuito eléctrico, liberamos los electrones acumulados, permitimos que fluyan fuera del ánodo, pasen por algún dispositivo (una bombilla, un portátil, un teléfono) y por fin regresen a la batería por el otro lado (el cátodo). Por comunes que sean, las baterías son tremendamente ingeniosas. Almacenan energía en un conjunto de electrones abarrotados, ansiosos por liberar su energía y alimentar con ella el aparato que sea.

En una célula viva nos encontramos con una situación análoga, solo que en lugar de una acumulación de electrones, lo que tenemos es una acumulación de protones. Pero esa distinción no importa demasiado. Igual que los electrones, los protones llevan todos la misma carga, de modo que también se repelen mutuamente. Así pues, en una célula, las reacciones redox cargan unas baterías biológicas de protones. De hecho, como los protones se encuentran todos agregados a un lado de una membrana extremadamente fina (con un grosor de unas pocas docenas de átomos), el campo eléctrico (el voltaje de la membrana dividido por su grosor) puede ser enorme, por encima de decenas de millones de voltios por metro. Las baterías celulares no son precisamente flojas.

¿Qué hacen entonces las células con estas minicentrales? Aquí es donde las cosas se ponen todavía más interesantes. Pegadas a la membrana hay numerosas nanoturbinas. Cuando a los protones acumulados se les permite fluir de vuelta a través de regiones específicas de la membrana, hacen girar esas minúsculas turbinas de modo parecido a como el viento mueve las aspas de los molinos. En siglos pasados, el sistema de rotación de estos se usaba para moler el trigo y otros cereales para hacer harina. Los molinos celulares hacen algo análogo, pero en lugar de pulverizar una estructura, la construyen. Al girar, las turbinas moleculares aprietan una y otra vez dos moléculas

determinadas (ADP, o difosfato de adenosina, y un grupo fosfato), para sintetizar otra molécula (ATP o trifosfato de adenosina). Al verse forzados a unirse por la turbina, los constituyentes de cada molécula de ATP se encuentran en una posición tensa: unos constituyentes que se repelen mutuamente se encuentran unidos mediante enlaces químicos y, como un muelle comprimido, luchan por liberarse. Eso resulta bastante útil. Las moléculas de ATP pueden viajar por toda la célula, liberando la energía que llevan almacenada cuando se necesita, lo que consiguen rompiendo los enlaces y permitiendo que las partículas constituyentes se relajen en un estado de menor energía, más confortable. Es esa energía liberada por la disociación de moléculas de ATP la que impulsa las funciones celulares.

La incansable actividad de esas centrales energéticas de las células se hace evidente en cuanto hacemos unos pocos números. Las funciones que mantienen viva una célula típica durante un solo segundo requieren la energía almacenada en unos «diez millones» de moléculas de ATP. Nuestro cuerpo contiene decenas de billones de células, lo que significa que cada segundo consumimos del orden de cien trillones (10^{20}) de moléculas de ATP. Cada vez que se usa un ATP, se divide en sus componentes (ADP y un fosfato), y las turbinas alimentadas por las baterías de protones vuelven a forzar su unión, acuñando unas moléculas de ATP nuevas y rejuvenecidas. Estas moléculas de ATP vuelven a ponerse en marcha para entregar energía por toda la célula. Para satisfacer las demandas energéticas del cuerpo, las turbinas celulares tienen que ser extraordinariamente productivas. Por rápido que uno lea, en el tiempo que se tarda en leer esta frase el cuerpo sintetiza unos quinientos trillones de moléculas de ATP. Y justo ahora, unos trescientos trillones más.

Resumen

Dejando de lado los detalles, la conclusión es que a medida que los electrones energéticos de los alimentos (o los electrones energizados por la luz del sol en las plantas) caen en cascada por un vuelo de escaleras químicas, la energía liberada en cada escalón carga baterías biológicas en el interior de todas las células. La energía almacenada en las baterías se utiliza entonces para sintetizar moléculas que hacen con ella lo que los camiones de los

repartidores hacen con los paquetes: las moléculas distribuyen de manera fiable paquetes de energía en el lugar de la célula donde se requieran. Este es el mecanismo universal que impulsa toda la vida. Esta es la singular vía que recorre la energía en «cada» acción y en «cada» pensamiento.

Como en nuestra breve exploración del ADN, la cuestión más importante está por encima de los detalles: la compleja y aparentemente barroca colección de procesos que impulsan las células es universal para toda la vida. Esa unidad, junto con la de la codificación en el ADN de las instrucciones celulares, constituye una prueba abrumadora de que toda la vida surgió de un antepasado común.

Del mismo modo que Einstein buscó una teoría unificada de las fuerzas de la naturaleza, y de la misma manera que los físicos actuales sueñan con una síntesis aún más amplia que englobe toda la materia y quizá también el espacio y el tiempo, hay algo bastante seductor en la identificación de un núcleo común en un amplísimo abanico de fenómenos en apariencia distintos. Que el funcionamiento interno más profundo de todos los seres vivos, desde mis dos perros, que descansan plácidamente sobre la moqueta, hasta el caótico torbellino de insectos atraídos por la lámpara que hay junto a mi ventana, el coro de ranas que cantan desde un estanque cercano y los coyotes que ahora mismo oigo aullar en la lejanía, que en todos ellos, insisto, el funcionamiento interno dependa de los mismos procesos, es sencillamente espectacular. Así que dejemos a un lado los detalles, respiremos profundamente antes de concluir el capítulo, y permitamos que la comprensión de este prodigio acabe de posarse.

Evolución antes de la evolución

Comprender cuestiones vitales no solo nos brinda una claridad inesperada, sino que también nos anima a una exploración todavía más profunda. ¿Cómo surgió el antepasado común de toda la vida compleja? Y, aún más profundamente, ¿cómo comenzó la vida? Los científicos todavía tienen que determinar el origen de esta, pero nuestra discusión deja claro que la pregunta tiene tres aspectos. ¿Cómo surgió el componente genético de la vida, la capacidad de almacenar, utilizar y replicar información? ¿Cómo surgió el componente metabólico de la vida, la capacidad de extraer, almacenar y

utilizar energía química? ¿Cómo surgió el empaquetado de la maquinaria genética y molecular en unas bolsas autónomas, las células? La historia del origen de la vida requiere respuestas definitivas a estas preguntas, pero aunque todavía no las comprendemos del todo, podemos apelar a un marco explicativo, la evolución darwiniana, que, casi con seguridad, formará parte del relato que finalmente hilvanemos.

La primera vez que estudié la evolución darwiniana, mi profesor de biología presentó la teoría como si se tratase de la ingeniosa solución a un acertijo que, una vez entendido, debía llevarnos a darnos con la mano en la frente y exclamar: «Pero ¿cómo no se me había ocurrido?». La incógnita consiste en explicar el origen de la rica, diversa y abundante panoplia de especies que habitan en nuestro planeta. La solución de Darwin se resume en dos ideas relacionadas. En primer lugar, cuando los organismos se reproducen, la progenie tiende a ser parecida pero no idéntica a sus progenitores. O, en las palabras de Darwin, la reproducción produce descendencia con modificación. En segundo lugar, en un mundo con recursos finitos hay que competir para sobrevivir. Las modificaciones biológicas que mejoran el éxito en la competencia aumentarán la probabilidad de que quien las posea sobreviva el tiempo suficiente para reproducirse y, por lo tanto, para transmitir a generaciones futuras aquellos rasgos que mejoran la supervivencia. Con el tiempo se irán acumulando lentamente distintas combinaciones de modificaciones exitosas que empujarán a la población inicial a ramificarse en grupos que constituyen especies distintas[29].

Simple e intuitiva, la evolución darwiniana parece casi una perogrullada. Sin embargo, por convincente que resulte como marco explicativo, si la evolución darwiniana no estuviese respaldada por datos no habría conseguido el consenso de los científicos. La lógica no basta. La confianza en la evolución darwiniana se debe al respaldo abrumador que ha recibido de los científicos que han estudiado modificaciones graduales en la estructura de los organismos y han determinado las ventajas adaptativas que muchos de esos cambios confieren. Si esas transformaciones no se hubiesen producido, o si lo hubiesen hecho sin pauta evidente o sin guardar relación con la capacidad del portador de sobrevivir o reproducirse, hoy la evolución darwiniana no se enseñaría en las escuelas.

Darwin no especificó la base biológica que explica la descendencia con modificación. ¿Cómo transmiten los seres vivos sus rasgos a su progenie? ¿Y cómo pasan algunos de esos rasgos a la descendencia en una forma modificada? En tiempos de Darwin no se conocían las respuestas. Todo el

mundo se daba cuenta de que la pequeña Mary se parecía a papá y mamá, pero el conocimiento de los mecanismos moleculares para la transmisión de rasgos se encontraba todavía a muchos descubrimientos de distancia. Que Darwin pudiera desarrollar la teoría de la evolución pese a desconocer esos mecanismos es prueba de la generalidad y potencia de aquellas ideas. Trascienden los detalles. No fue hasta casi un siglo después, en 1953, cuando el descubrimiento de la estructura del ADN desbrozó el sendero que conduce a la base molecular de la herencia. Con elegante contención, Watson y Crick concluyeron su artículo con una frase que se encuentra entre las más famosas del mundo por su modestia: «No se nos escapa que las parejas específicas que hemos postulado sugieren de inmediato un posible mecanismo de copia del material genético».

Watson y Crick desvelaron el proceso que usa la vida para duplicar las moléculas que almacenan las instrucciones internas de la célula, que es lo que permite transmitir copias de esas instrucciones a la progenie. Como hemos visto, la información que dirige la función celular se encuentra codificada en la secuencia de bases unidas a los largueros de la escalera de caracol del ADN. Cuando una célula se prepara para reproducirse, para dividirse en dos, la escalera de ADN se parte en dos por el centro, dejando dos largueros, cada uno de ellos con una secuencia de bases. Como las secuencias son complementarias (una A en un larguero implica una T en la misma posición del segundo larguero, y lo mismo para la C y la G), cada larguero sirve de plantilla para fabricar una copia del otro. Añadiendo las bases que correspondan en cada uno de los dos largueros, la célula crea dos copias completas de la hebra original de ADN. De este modo, en el momento de la división celular, cada una de las células hijas recibe uno de los duplicados, y se transmite así la información genética de una generación a la siguiente. Este es el mecanismo de copia que no se les escapaba a Watson y Crick.

Tal como lo hemos descrito, este proceso produciría hebras de ADN idénticas. Entonces ¿cómo aparecen los rasgos nuevos o modificados en las células hijas? Por error. Ningún proceso es perfecto al 100 %. Aunque sean poco frecuentes, se producen fallos, a veces de manera fortuita, otras veces infligidos por influencias ambientales, por ejemplo fotones energéticos (rayos X o ultravioleta) que pueden corromper el proceso de copia. Así pues, la secuencia de ADN que hereda una célula hija puede diferir de la de sus progenitores. A menudo, esas modificaciones carecen de importancia, como un único error tipográfico en una página de *Guerra y paz*. Otras, en cambio, afectan al funcionamiento de la célula, para bien o para mal. En el primero de

estos casos, como mejoran la aptitud biológica, la *fitness*, tienen una mayor probabilidad de transmitirse a las siguientes generaciones, y por tanto de extenderse por la población.

La reproducción sexual añade complejidad porque el material genético no se duplica limpiamente, sino que se mezclan las contribuciones de los dos progenitores. Pero aunque este tipo de reproducción (cuyo origen todavía se debate) supuso un gran paso en la historia de la vida en la Tierra, los principios darwinianos se aplican del mismo modo. La mezcla y copia del material genético produce variaciones en los rasgos heredados, y los que tienen mayor probabilidad de persistir con el paso de las generaciones son los que mejoran en su portador las probabilidades de sobrevivir y reproducirse.

Un aspecto esencial de la evolución es que durante la transmisión de progenitores a descendientes, las modificaciones del ADN suelen ser poco frecuentes. Esta estabilidad protege las mejoras genéticas acumuladas durante generaciones anteriores, garantizando que no se degraden rápidamente o desaparezcan. Para hacernos una idea de lo raros que son esos cambios, los errores de copia se cuelan al ritmo de más o menos uno de cada cien millones de pares de bases de ADN. Eso es como si un escriba medieval se equivocase en una letra de cada treinta copias de la Biblia. Y aun esa tasa tan minúscula es una sobreestimación, porque el 99 % de los errores son reparados por mecanismos químicos de corrección que actúan dentro de cada célula, con lo que la tasa neta de error se reduce más o menos a uno por cada diez mil millones de pares de bases.

Pero incluso una modificación genética tan ínfima, acumulada durante muchas generaciones puede dar lugar a grandes modificaciones físicas y fisiológicas. Esto no es evidente. Ante el prodigio del ojo, las capacidades del cerebro o la complejidad de los mecanismos celulares relacionados con la energía, hay quien llega a la conclusión de que estos sistemas no podrían haber evolucionado sin una guía inteligente. Esa conclusión estaría justificada si el desarrollo evolutivo se produjese a nuestra escala de tiempo. Pero no es así. La vida lleva evolucionando «miles de millones» de años. Eso son «decenas de millones» de siglos. Si representamos un año con una lámina de papel impreso, mil millones de años corresponderían a una pila de casi cien kilómetros de altura. Imaginemos que esas páginas conforman un folioscopio más grueso que diez veces la altura del monte Everest. Aunque el dibujo de cada página casi no difiera del precedente, los dibujos del principio y el final del libro pueden ser tan distintos como un chimpancé de una ameba.

No quiero decir con ello que el cambio evolutivo siga un plan cuidadosamente diseñado que progresa de forma gradual y eficiente, página a página, desde los organismos simples a los complejos. Al contrario, la evolución por medio de la selección natural se describe mejor como innovación por ensayo y error. Las innovaciones surgen de combinaciones y mutaciones aleatorias del material genético. Los ensayos enfrentan unas innovaciones a otras en el ruedo de la supervivencia. Los errores, por definición, son innovaciones que pierden. Esta manera de innovar llevaría a la quiebra a cualquier negocio. Probar una posibilidad aleatoria tras otra con la esperanza vana de que tarde o temprano se dé con la ganadora en el mercado… es una estrategia que nadie querría exponer ante un consejo de dirección. Pero a la naturaleza le sobra un recurso que en los negocios escasea: tiempo. La naturaleza no tiene prisa y no tiene que cumplir unos objetivos. Así que puede soportar el coste de innovar mediante pequeños cambios aleatorios[30].

Otro factor esencial es que no hay un folioscopio evolutivo aislado. Cada división celular en cada uno de los organismos que ocupan cada rincón del planeta contribuye al relato darwiniano. Algunas de esas líneas argumentales se quedan en nada (modificaciones genéticas perjudiciales). La mayoría no añaden nada nuevo al argumento (material genético transmitido sin cambio). Pero algunas proporcionan giros inesperados (modificaciones genéticas adaptativas y útiles) y desarrollan sus propios folioscopios evolutivos. Muchos de estos, de hecho, tienen tramas y subtramas interdependientes, de modo que el relato evolutivo de un folioscopio se ve influido por el de otro. Así pues, la riqueza de la vida en la Tierra refleja la enorme duración de las crónicas que ha escrito la naturaleza.

Como en cualquier ámbito de investigación saludable, en el de la evolución darwiniana se ha debatido y refinado la teoría durante décadas. ¿A qué ritmo evolucionan las especies? ¿Difiere esa velocidad mucho o poco en el tiempo? ¿Hay largos períodos de estasis seguidos de cortos períodos de cambio más rápido? ¿O el cambio siempre es gradual? ¿Cómo debemos considerar los rasgos que reducen la supervivencia del organismo pero aumentan la probabilidad de que se reproduzca? ¿Cuál es el abanico completo de mecanismos por medio de los cuales cambian los genes de una generación a otra? ¿Qué debemos pensar de las lagunas en el registro evolutivo? Algunas de estas cuestiones han suscitado apasionadas reyertas científicas, pero, y esto es lo fundamental, ninguna nos ha llevado a dudar de la propia evolución. Los detalles del cualquier marco explicativo pueden, deben y serán

perfeccionados con el tiempo, pero los cimientos de la teoría darwiniana son sólidos como una roca.

Y eso plantea una pregunta: ¿Es posible que la evolución darwiniana sea relevante en un ámbito más grande que la vida? Al fin y al cabo, los ingredientes esenciales (replicación, variación y competencia) no se limitan a los seres vivos. Las impresoras replican páginas. Las distorsiones ópticas producen variaciones en las copias. El receptor inalámbrico de la impresora compite por un ancho de banda limitado. Imaginemos, pues, un contexto más cercano al de la vida que las impresoras de oficina, pero decididamente inanimado: moléculas que han adquirido la capacidad de replicarse. El ADN es el principal ejemplo, y debemos tenerlo presente. Pero la replicación del ADN (el proceso por el que se abre la escalera en caracol y a partir de cada larguero se construyen dos moléculas de ADN completas), depende de un ejército de proteínas celulares, así que requiere que los procesos de la vida ya estén desarrollados.

Imaginemos, en cambio, una molécula que pudiera replicarse por su cuenta mucho antes del origen de la vida. No es necesario que decidamos un mecanismo de replicación concreto, pero para hacernos una imagen mental más exacta podemos suponer que, mientras flota en un rico caldo químico, este tipo de molécula actúa como un imán molecular que atrae con fuerza los ingredientes que la componen y proporciona una plantilla para ensamblarlos en su imitador molecular. Imaginemos, además, que el proceso de replicación, como todos los procesos del mundo real, es imperfecto. La mayor parte del tiempo las moléculas sintetizadas son idénticas a las originales, pero en ocasiones no lo son. Con el paso de un gran número de generaciones moleculares, construiríamos este modo un ecosistema habitado por un abanico de moléculas que son variantes de la original.

En todo medio hay siempre materias primas limitadas, recursos limitados. Así pues, a medida que en nuestro ecosistema las moléculas siguen replicándose, las que se repliquen de forma más eficiente y precisa (rápido, barato, pero de ningún modo fuera de control) prevalecerán. Esas moléculas consiguen el título de «aptas» o «eficaces» (*fitness* elevada), y con el tiempo acabarán predominando en la población molecular. Cada mutación que aparezca con posterioridad a causa de la replicación imperfecta ofrecerá nuevas modificaciones de la eficacia molecular. Y tal como ocurre en todo lo que vive, también en lo que no vive: las modificaciones que mejoren la eficacia molecular triunfarán sobre las que no la mejoren. La mayor

fecundidad de las moléculas más eficaces inclina la demografía a favor de esas moléculas.

Lo que acabo de describir es una versión molecular de la evolución: «darwinismo molecular». Nos enseña cómo grupos de moléculas que interactúan guiadas únicamente por las leyes de la física pueden ir mejorando su capacidad reproductora, algo que solemos asociar con los seres vivos. Si pensamos ahora en el origen de la vida, lo que todo esto sugiere es que el darwinismo molecular podría haber sido un mecanismo esencial durante los tiempos que precedieron a la aparición de la vida. Una versión de esta sugerencia, aún lejos del consenso, pero que cuenta con un buen número de seguidores, centra su atención en una molécula especial y de muy variados talentos: el ARN.

Hacia el origen de la vida

En la década de 1960, un grupo de destacados investigadores, entre ellos Francis Crick, el químico Leslie Orgel y el biólogo Carl Woese, llamaron la atención sobre un primo cercano del ADN llamado ARN (ácido ribonucleico), que hace unos cuatro mil millones de años podría haber dado el pistoletazo de salida a una fase de darwinismo molecular anterior al origen de la vida.

El ARN es una molécula extraordinariamente versátil y un componente esencial de todos los sistemas vivos. Podemos concebirla como una versión de ADN más corta y de una sola hebra, un solo larguero a lo largo del cual se une una secuencia de bases. Entre los variados papeles que desempeña en la célula, el ARN es un mediador químico que copia diversas secciones cortas de una hebra «desabrochada» de ADN de modo parecido a como un dentista hace un molde de los dientes cuando separamos las mandíbulas, y transporta esa información a otras partes de la célula, donde dirige la síntesis de proteínas específicas. Al igual que el ADN, las moléculas de ARN son portadoras de información celular y, por consiguiente, son un componente más del *software* de la célula. Pero hay una diferencia importante entre el ADN y el ARN: mientras que al primero le satisface erigirse como oráculo de la célula, el segundo está dispuesto a arremangarse y hacer el trabajo manual de los procesos químicos. De hecho, los ribosomas de las células, que son las

fábricas en miniatura que juntan aminoácidos para hacer proteínas, poseen en su interior un tipo particular de ARN, llamado ARN ribosómico.

Así que el ARN puede ser tanto *software* como *hardware*. Puede tanto dirigir como catalizar reacciones químicas. Y entre esas reacciones hay algunas que promueven la replicación del propio ARN. Mientras que la maquinaria molecular que hace copias de ADN usa una compleja serie de tuercas y engranajes químicos, el ARN puede promover la síntesis de las bases necesarias para su propia replicación. Pensemos en las implicaciones de eso. Las moléculas de ARN, que son *software* y *hardware*, pueden eludir el acertijo de la gallina y el huevo: ¿cómo ensamblas una maquinaria molecular si no tienes antes el programa molecular, las instrucciones para el ensamblaje? ¿Cómo sintetizas un programa molecular sin tener primero la maquinaria molecular, la infraestructura para efectuar el ensamblaje? El ARN, huevo y gallina a la vez, engloba las dos funciones, y por eso puede impulsar una era de darwinismo molecular.

Eso es la hipótesis del mundo de ARN, que imagina que antes de la vida hubo un mundo repleto de moléculas de ARN que, por medio del darwinismo molecular, evolucionaron a lo largo de un número inconcebible de generaciones hasta formar las estructuras químicas que constituyeron las primeras células. Aunque los detalles son provisionales, los científicos han hecho un esbozo de cómo podría haber sido esta primera fase de la evolución molecular. En la década de 1950, el premio Nobel Harold Urey y su estudiante de doctorado Stanley Miller mezclaron los gases (hidrógeno, amoníaco, metano y vapor de agua) que, según creían, constituían la atmósfera primigenia de la Tierra. Después de someter este cóctel gaseoso a corrientes eléctricas para simular relámpagos, comunicaron al mundo su célebre descubrimiento de que el limo pardo resultante contenía aminoácidos, las piezas con las que se construyen las proteínas. Aunque investigaciones posteriores demostraron que las mezclas de gases que estudiaron Miller y Urey no reflejaban de forma precisa la composición química de la atmósfera primigenia de la Tierra, experimentos parecidos realizados con otros cócteles de gases que sí la reflejaban (entre ellos una mezcla que los propios Miller y Urey habían elaborado como modelo de los humos tóxicos de los volcanes activos y que, curiosamente, quedó sin analizar durante más de medio siglo)[31] lograron igualmente generar aminoácidos. Además, actualmente ya se han detectado aminoácidos en nubes interestelares, cometas y meteoritos. Así pues, es plausible que en la joven Tierra hubiera caldos químicos donde

se mezclasen moléculas replicantes de ARN con un abundante surtido de aminoácidos.

Imaginemos que, a medida que las moléculas de ARN se replicaban, una mutación al azar conseguía facilitar algo nuevo: de algún modo, el ARN mutante llevaba a algunos de los aminoácidos de aquel caldo a unirse en cadenas y formar la primera proteína rudimentaria (una versión burda de los procesos que hoy tienen lugar en los ribosomas). Si, por azar, algunas de estas proteínas básicas incrementaban la eficiencia de replicación del ARN (al fin y al cabo, catalizar reacciones es lo que hacen las proteínas), se verían bien recompensadas: las proteínas llevarían a la forma mutante de ARN a dominar, y esta abundancia de ARN llevaría a la síntesis de más proteínas. En tándem, formarían un bucle químico que se reforzaría a sí mismo y convertiría aquellas aberraciones moleculares aleatorias en la norma. Con el tiempo, esas maquinaciones moleculares podrían dar con otra novedad química, una escalera de dos largueros, una forma rudimentaria de ADN con una estructura más estable y eficiente para la replicación molecular, que gradualmente iría usurpando los procesos de replicación hasta relegar el ARN a un papel secundario. La formación fortuita de bolsas moleculares (células) habría incrementado todavía más la eficacia, la *fitness*, al concentrar los productos químicos en compartimentos y ofrecer protección química frente a las perturbaciones del ambiente. De este modo, esparcidas por la población química, se irían ensamblando las estructuras necesarias para la formación de las primeras células rudimentarias[32].

Y surgiría la vida.

El mundo de ARN no es sino una de muchas propuestas, un ejemplo de las que ponen el énfasis en el componente genético de la vida: moléculas que guardan información y que, por medio de la replicación, la transfieren a generaciones posteriores. De ser correcta, todavía tendríamos que abordar la cuestión del origen del propio ARN; tal vez una fase todavía más temprana de evolución molecular habría generado ARN a partir de constituyentes químicos más simples. Otras proposiciones hacen hincapié en el componente metabólico de la vida: moléculas que catalizan reacciones. En lugar de partir de una molécula replicante que puede actuar como proteína, estos escenarios comienzan con proteínas que se pueden replicar. Aún otras proposiciones conciben dos procesos completamente distintos, uno que conduce a moléculas que se pueden replicar y otro que conduce a moléculas que pueden catalizar reacciones químicas, y solo más tarde estos dos procesos se dan cita en

células que pueden realizar las funciones básicas de reproducción y metabolismo.

Tampoco faltan propuestas acerca de dónde se formaron los precursores químicos de la vida. Algunos investigadores concluyen que la sugerencia improvisada de Darwin de una «pequeña laguna caliente» no resulta especialmente prometedora a causa de los cientos de millones de años que sobre la superficie de la Tierra llovieron meteoritos rocosos que debieron hacerla inhóspita[33]. Aún así, el biólogo David Deamer ha sugerido que para el origen de la vida es esencial un entorno que fluctúe entre seco y mojado, como el limo de la ribera de un estanque o laguna. Las investigaciones de su equipo han demostrado que esos ciclos de sequedad y humedad pueden empujar a los lípidos a formar membranas (envoltorios celulares) dentro de las cuales se facilitaría que se unieran moléculas pequeñas en cadenas largas al estilo del ARN y el ADN[34]. El químico Graham Cairns-Smith ha propuesto que los cristales que constituyen los lechos arcillosos (estructuras que crecen de forma continua encerrando átomos dentro de una pauta ordenada y repetida) podrían haber constituido un sistema primigenio de replicación que habría servido de precursor de este comportamiento en moléculas orgánicas más complejas camino de la vida[35]. Otro ambiente factible y convincente, sugerido y analizado por el geoquímico Mike Russell y el biólogo Bill Martin, es el constituido por grietas del fondo del océano de las que emana una mezcla caliente y rica en minerales fruto de la interacción entre el agua del mar y las rocas que forman el manto de la Tierra[36]. Estos humeros hidrotermales alcalinos construyen por precipitación unas chimeneas calizas que se elevan sobre el fondo marino, en algunos casos de hasta más de cincuenta metros de altura, más que la Estatua de la Libertad, y están llenas de grietas y resquicios por los que continuamente se filtra una mezcla de sustancias químicas ricas en energía. La propuesta imagina que dentro de los muchos torbellinos que se forman en el interior de estas torres, la magia química del darwinismo molecular produce replicantes que con el tiempo ganan en complejidad y sofisticación hasta engendrar la vida en la Tierra.

Los detalles son objeto de investigaciones de vanguardia. Hasta el momento, los intentos por recrear estos procesos han arrojado resultados interesantes, pero no concluyentes. Todavía no hemos conseguido crear vida, pero no tengo la menor duda de que un día, quizá no muy lejano, lo lograremos. Entretanto, ya está cobrando forma un relato científico general sobre su origen. Una vez que las moléculas adquieren la capacidad de replicarse, las mutaciones y errores aleatorios alimentan el darwinismo

molecular y empujan los productos químicos resultantes a ascender por el vector fundamental de la eficacia biológica, de la *fitness*. A lo largo de cientos de millones de años, el proceso logra construir la arquitectura química de la vida.

La física de la información

Llegados a este punto, uno podría llegar a la conclusión de que las moléculas de la vida debían poseer muchos conocimientos de química orgánica, pues de otro modo, ¿cómo habrían sabido lo que se suponía que tenían que hacer? ¿Cómo sabe el ADN dividirse a lo largo y luego añadir bases complementarias a las que quedan expuestas, creando un molécula duplicada? ¿Cómo sabe el ARN crear copias de secciones de ADN, transportar esa información a las estructuras celulares apropiadas donde otras moléculas distintas, pero emparentadas con ellas, son capaces de leer el código genético, y enlazar las secuencias adecuadas de aminoácidos para formar proteínas funcionales?

Las moléculas, naturalmente, no saben nada. Su comportamiento está gobernado por las ciegas, inconscientes e incultas leyes de la física. Pero la pregunta sigue ahí: ¿cómo consiguen realizar de manera constante y fidedigna tan intrincadas series de complejas reacciones químicas? Es una cuestión que nos devuelve a nuestra paráfrasis de la pregunta inicial de Schrödinger en *¿Qué es la vida?* La agitación y traqueteo de las moléculas de una piedra están gobernadas por las leyes de la física. La agitación y traqueteo de las moléculas de un conejo también están regidas por las leyes de la física. ¿En qué difieren? Ahora sabemos que las partículas del conejo actúan guiadas por una influencia adicional: el archivo de información interno del conejo, su *software* celular. Lo importante, crítico y vital es que esa información no quebranta las leyes de la física. Nada lo hace. Del mismo modo que un tobogán de agua no quebranta las leyes de la gravedad, pero gracias a su forma guía a quienes lo usan para que tomen una trayectoria determinada que de otro modo no seguirían, el *software* celular del conejo funciona gracias a un orden químico que, por medio de sus formas, estructuras y constituyentes, guía diversas moléculas para que tomen unas trayectorias que de otro modo tampoco seguirían.

¿Cómo funcionan esas guías moleculares? Gracias a la disposición detallada de sus átomos constituyentes, una molécula determinada puede atraer este aminoácido, repeler aquel otro o mostrarse del todo indiferente ante un tercero. O, como piezas de Lego, cierta molécula puede encajar solamente en otra molécula determinada. Todo eso es física. Cuando átomos y moléculas tiran o empujan o encajan unos con otros, lo que hay detrás es la fuerza electromagnética. La clave, pues, es que la información que guarda la célula no es abstracta. No es un conjunto separado de instrucciones que las moléculas tengan que estudiar, aprender y ejecutar, sino que está codificada en las propias estructuras y configuraciones químicas, unas configuraciones que llevan a otras moléculas a chocar, unirse o interactuar con ellas de tal manera que lleven a cabo procesos celulares como el crecimiento, la reparación o la reproducción. Aunque las moléculas del interior de una célula carecen de intención o propósito, aunque obviamente son inconscientes, su estructura física les permite realizar tareas muy especializadas.

En este sentido, los procesos de la vida son divagaciones moleculares plenamente descritas por la ley física, pero al propio tiempo escriben, a un nivel superior, un relato basado en la información. En la piedra no hay relato a nivel superior. En ella, usamos las leyes de la física para describir las colisiones y movimientos de las moléculas y listo, hemos acabado. Pero cuando usamos las mismas leyes de la física para describir las colisiones y movimientos de las moléculas del conejo, la historia no se acaba ahí. Ni de lejos. Por encima del relato reduccionista hay otro más que nos habla de las disposiciones moleculares internas únicas del conejo, responsables de coreografiar un exquisito abanico de movimientos moleculares organizados. Son esos movimientos moleculares los que realizan los procesos de un nivel superior en el interior de las células del conejo.

De hecho, en el conejo, como en nosotros mismos, esa información biológica también está organizada a escalas mayores, guiando procesos que actúan no ya dentro de células individuales, sino en conjuntos de células, y llevan el sello distintivo de la complejidad coordinada. Cuando cogemos una taza de café, el movimiento de cada uno de los átomos que forman cada una de las moléculas de la mano, el brazo, el cuerpo y el cerebro está gobernado por las leyes de la física. Digámoslo una vez más: la vida ni contraviene ni puede contravenir las leyes de la física. Nada puede. Pero el hecho de que un número ingente de moléculas de nuestro cuerpo sean capaces de actuar de forma concertada, coordinando sus movimientos para que el brazo se extienda sobre la mesa y la mano coja una taza, refleja la enorme riqueza de la

información biológica que, encarnada en configuraciones atómicas y moleculares, dirige una gran profusión de complejos procesos moleculares.

La vida es física orquestada.

Termodinámica y vida

La evolución, de acuerdo con Darwin, guía el desarrollo de estructuras, de las moléculas a las células y los organismos pluricelulares complejos. La entropía, de acuerdo con Boltzmann, traza el desarrollo de los sistemas físicos, de los aromas que se difunden a los motores que rechinan o las estrellas que arden. La vida está sujeta a estas dos influencias. Surgió y fue cambiando gracias a la evolución y, como todos los sistemas físicos, obedece los preceptos de la entropía. En los dos últimos capítulos de *¿Qué es la vida?*, Schrödinger explora la aparente tensión entre ambos. Cuando la materia se condensa en vida, mantiene un estado de orden durante largos períodos de tiempo. Y cuando la vida se reproduce, genera conjuntos adicionales de moléculas que también se disponen formando estructuras ordenadas. ¿Dónde está en todo esto la entropía, el desorden, la segunda ley de la termodinámica?

En su respuesta, Schrödinger explica que los organismos se resisten al aumento de la entropía «alimentándose de entropía negativa»[37], una expresión que durante décadas ha generado algo de confusión y críticas puntillosas. Pero es evidente que, aunque lo expresó en un lenguaje un tanto distinto, la respuesta de Schrödinger es exactamente la misma que venimos desarrollando aquí: el paso a dos de la entropía. Los seres vivos no están aislados, así que toda cuantificación de la segunda ley debe incorporar su entorno. Yo, sin ir más lejos, he conseguido evitar durante más de medio siglo que mi entropía se dispare. Pero eso lo he logrado asimilando estructuras ordenadas (sobre todo verduras, frutos secos y cereales) para quemarlas lentamente (por medio de reacciones redox, electrones de los alimentos que caen en cascada por las gradas del estadio hasta combinarse finalmente con el oxígeno que respiro), y luego usar la energía liberada para impulsar diversas actividades metabólicas e incrementar la entropía de mi entorno con calor y desechos. En conjunto, el paso a dos ha permitido que mi entropía aparentemente burle la segunda ley cuando, en realidad, mi entorno me ha ido cubriendo las espaldas diligentemente, absorbiendo la diferencia de entropía

(y más). El proceso de quemar, almacenar y liberar energía que alimenta las funciones celulares es más sofisticado que el proceso correspondiente que impulsa las máquinas de vapor, pero desde el punto de vista de la entropía, la física esencial es la misma.

Más allá de la elección de palabras de Schrödinger, una preocupación menos quisquillosa es el origen del nutrimento de alta calidad y baja energía. Si empezando por los animales descendemos por las cadenas tróficas, al final encontramos plantas que se alimentan directamente de la radiación solar. Su ciclo de energía proporciona un ejemplo más del paso a dos de la entropía. Los fotones que llegan con la luz solar y son absorbidos por las células de las plantas hacen saltar electrones a estados de energía más altos, y esta energía es luego aprovechada por la maquinaria celular (por medio de una serie de reacciones redox que guían a los electrones en su descenso por las gradas del estadio) para impulsar diversas funciones celulares. Así pues, los fotones que provienen del Sol son el nutrimento de calidad y baja entropía que las plantas absorben, aprovechan para alimentar las funciones vitales y luego liberan en una forma de alta entropía, en una forma degradada como desecho (por cada fotón recibido del Sol, la Tierra envía de vuelta al espacio una colección menos ordenada de una media docena de fotones infrarrojos de baja energía y alta dispersión[38]).

Si queremos seguirle un poco más la pista a la fuente de baja energía, tenemos que remontarnos al origen del Sol, que tiene que ver con la historia gravitacional del capítulo 3: la gravedad comprime nubes de gas en estrellas, reduciendo la entropía interna y, por medio del calor liberado, aumentando la del entorno. Con el tiempo, se desencadenan reacciones nucleares, y las estrellas se encienden y comienzan a enviar fotones hacia el exterior. Cuando esa estrella es el Sol, los fotones que alcanzan la Tierra constituyen una fuente de energía de baja entropía que alimenta el metabolismo de las plantas. Por eso algunos investigadores dicen que la fuerza de la gravedad sustenta la vida. Aunque cierto, a estas alturas ya habrá quedado claro que yo prefiero repartir el crédito de manera más equitativa, elogiando la gravedad por hacer que la materia se agregue y conforme entornos estelares estables, pero alabando también la fusión nuclear por la incansable producción de una corriente constante de fotones de alta calidad durante miles de millones de años.

La fuerza nuclear, en tándem con la gravedad, es la fuente del combustible de baja entropía que alimenta la vida.

¿Una teoría general de la vida?

En sus conferencias de 1943, Schrödinger subrayó que el torrente de avances científicos había sido tan intenso que «a una sola mente le resulta casi imposible dominar más que una pequeña parcela especializada»[39]. En consecuencia, animaba a los pensadores a ampliar el alcance de su conocimiento explorando ámbitos fuera del territorio habitual de sus disciplinas. Con *¿Qué es la vida?* se atrevió a aplicar la formación, intuición y sensibilidad del físico a los enigmas de la biología.

En las décadas que han pasado desde entonces, el conocimiento se ha ido especializando todavía más, pero una cohorte cada vez más nutrida de investigadores ha seguido oyendo la llamada interdisciplinar de Schrödinger. Y muchos han respondido. Investigadores formados en campos tan dispares como la física de alta energía, la mecánica estadística, las ciencias de la computación, la teoría de la información, la química cuántica, la biología molecular y la astrobiología, entre muchas otras, han desarrollado formas nuevas y perspicaces de explorar la naturaleza de la vida. Acabaré este capítulo centrándome en una de esas empresas científicas que amplían el tema termodinámico y que, si culmina con éxito, un día nos podría ayudar a responder algunas de las preguntas más profundas de la ciencia: ¿es la vida algo tan improbable que solo ha aparecido en una única ocasión en un universo que contiene cientos de miles de millones de galaxias, cada una de ellas con cientos de miles de millones de estrellas, muchas de ellas con planetas en órbita? ¿O es la vida el resultado natural, quizá incluso inevitable, de ciertas condiciones ambientales básicas y relativamente comunes, lo que sugeriría que el cosmos está repleto de vida?

Para abordar preguntas tan amplias necesitamos principios igual de amplios. Hasta el momento, tenemos muchísimas pruebas de la enorme aplicabilidad de la termodinámica, una teoría física que Einstein describió como la única de la que se puede afirmar con seguridad que «nunca será destronada»[40]. Quizá al analizar la naturaleza de la vida y su origen y evolución podamos llevar aún más lejos la perspectiva de la termodinámica.

Eso es precisamente lo que han hecho algunos científicos durante las últimas décadas. La disciplina de investigación que han desarrollado, que se conoce como «termodinámica del no equilibrio», analiza de manera sistemática las clases de situaciones que ahora encontramos una y otra vez: energía de alta calidad que atraviesa un sistema alimentando el paso a dos de

la entropía y permitiendo de este modo que este resista la tendencia hacia el desorden interno que de otro modo se adueñaría de todo. El químico físico belga Ilya Prigogine, que fue galardonado con el premio Nobel de 1977 por sus trabajos pioneros en este campo, desarrolló las matemáticas que permiten analizar configuraciones de materia que, sujetas a una fuente continua de energía, pueden generar orden de manera espontánea, lo que él llamó «orden a partir del caos». En un buen curso de física de instituto es posible encontrarse con un ejemplo simple, pero no por ello menos impresionante: las células de Bénard. Para verlas, hay que calentar una placa con un líquido viscoso. Al principio no parece que pase nada, pero a medida que aumenta la energía que circula por el líquido, los movimientos moleculares aleatorios conspiran para producir un orden visible. Si se mira entonces el aceite desde lo alto, se ve que forma teselas, un conjunto de pequeñas cámaras hexagonales. Si se mira de lado, se observa cómo el líquido fluye de manera estable y ordenada, ascendiendo desde el fondo de cada cámara hexagonal hasta la superficie, para luego retornar al fondo de la cámara.

Desde el punto de vista de la segunda ley de la termodinámica, un orden espontáneo como este resulta totalmente inesperado. La razón de que aparezca es que las moléculas del líquido están sujetas a una influencia ambiental externa, el calor continuo de la llama. Esta insistente inyección de energía tiene un impacto significativo. En todo sistema se producen de manera ocasional fluctuaciones espontáneas que, por momentos, forman un patrón ordenado pequeño y localizado. Por lo general, esas minúsculas fluctuaciones se dispersan con rapidez hacia una forma desordenada. Pero el análisis de Prigogine demostró que cuando las moléculas se encuentran formando ciertos patrones especiales, se tornan particularmente competentes en la absorción de energía, y eso dicta un destino distinto. Si el sistema físico recibe de su entorno un flujo continuo de energía concentrada, los patrones moleculares especiales pueden usar esta para sustentar e incluso reforzar su conformación ordenada, al tiempo que devuelven a su entorno una forma degradada (menos accesible, más dispersa) de esa energía. Decimos entonces que los patrones ordenados disipan energía, y por ello se conocen como «estructuras disipativas». La entropía total, que incluye la del entorno, aumenta, pero el bombeo continuo de energía al sistema nos permite alimentar y mantener orden por medio de un paso a dos entrópico sostenido.

La descripción de Prigogine se asemeja a la explicación física, que se remonta a Schrödinger, de cómo consiguen los organismos eludir la degradación entrópica. No porque las células de Bénard estén vivas, sino

porque los seres vivos son también estructuras disipativas que absorben energía de su entorno, la utilizan para sustentar o incrementar su conformación ordenada, y liberan de nuevo a este una forma degradada de energía. Los resultados de Prigogine proporcionaron una articulación matemáticamente precisa de su eslogan, «orden a partir del caos», y muchos investigadores posteriores especularon con la posibilidad de desarrollar más aún esa matemática, que tal vez nos ayude a entender cómo surgieron las moléculas necesarias para la vida a partir del caos de movimientos moleculares de la Tierra primigenia.

De las muchas aportaciones de este programa, los trabajos recientes de Jeremy England (que amplió los resultados previos desarrollados por otros investigadores, entre ellos Christopher Jarzynski y Gavin Crooks) son especialmente interesantes[41]. Mediante ingeniosas manipulaciones matemáticas, England ha desvelado las implicaciones de la segunda ley de la termodinámica cuando se aplica a sistemas alimentados por una fuente externa de energía. Para hacerse una idea de sus resultados, imaginemos que estamos en un columpio de un parque. Como todo niño sabe por intuición, tenemos que lanzar las piernas hacia delante (y arquear el cuerpo) con el ritmo justo para columpiarnos y mantener un movimiento suave y rítmico. Ese ritmo, de acuerdo con la física básica, depende de la distancia entre la silla y el eje del columpio. Si lanzamos las piernas a un ritmo inadecuado, la discordancia rítmica impedirá que el columpio absorba de manera eficiente la energía que le proporcionamos, y no subirá mucho. Imaginemos, en cambio, que nuestro juguete posee una característica peculiar: a medida que lanzamos las piernas, la longitud del columpio cambia para ajustar el período de su movimiento de manera que concuerde con el de nuestras piernas. Esta «adaptación» permite que el columpio coja el ritmo enseguida, absorba la energía que le damos y alcance rápidamente la altura deseada en cada ciclo. A partir de entonces la energía que proporcionamos al lanzar las piernas es absorbida por el columpio, pero no lo lleva a subir más alto, sino que mantiene su movimiento estable actuando contra las fuerzas de fricción contrapuestas y, de paso, produce desechos (calor, sonido y demás) que se disipan en el entorno (salvo que se trate de un diablillo como mi hija, que espera a llegar al punto más alto del columpio para saltar de la silla, salir volando y disipar energía rodando por el suelo).

El análisis matemático de England reveló que en el dominio molecular, las partículas que son «empujadas» por una fuente externa de energía pueden experimentar algo parecido a lo que ocurre en nuestro columpio. Un conjunto

inicialmente desordenado de partículas puede adaptar su configuración para «coger el ritmo», es decir, para adoptar una configuración que absorbe energía del ambiente con mayor eficiencia, la usa para mantener o mejorar su estructura o movimiento interno ordenado, y luego disipa una forma degradada de esa energía en el entorno.

England llama a este proceso «adaptación disipativa». Potencialmente, proporciona un mecanismo universal para convencer a ciertos sistemas moleculares para levantarse y bailar el paso a dos entrópico. Y como eso es lo que hacen los seres vivos para ganarse la vida (toman energía de alta calidad, la usan y luego expulsan energía de baja calidad en forma de calor y otros desechos), tal vez la adaptación disipativa sea esencial para el origen de la vida[42]. England señala que la propia replicación es una potente herramienta de adaptación disipativa: si un pequeño conjunto de partículas ha conseguido arreglárselas bien para absorber, usar y desechar energía, entonces dos conjuntos serán todavía mejores, y más aún cuatro u ocho, y así sucesivamente. Las moléculas que pueden replicarse podrían considerarse entonces como un producto «esperado» de la adaptación disipativa. Y en cuanto entran en escena moléculas replicantes, el darwinismo molecular comienza a actuar, y se pone en marcha el motor hacia la vida.

Estas ideas se encuentran todavía en pañales, pero no puedo dejar de pensar que habrían hecho feliz a Schrödinger. Con la ayuda de principios físicos elementales hemos conseguido comprender de algún modo el Big Bang, la formación de las estrellas y los planetas, la síntesis de átomos complejos, y ahora estamos camino de determinar cómo esos átomos podrían conformar moléculas replicantes bien adaptadas a extraer energía del entorno para construir y sustentar formas ordenadas. Con el poder del darwinismo molecular para seleccionar conjuntos de moléculas con una eficacia cada vez mayor, podemos imaginar que algunas lleguen a adquirir la capacidad de almacenar y transmitir información. Un manual de instrucciones transferido de una generación molecular a la siguiente que preserve estrategias de eficacia (*fitness*) bien contrastadas es una poderosa fuerza para el dominio molecular. A lo largo de cientos de millones de años, estos procesos podrían haber esculpido poco a poco las primeras formas de vida.

Tanto si los detalles de estas ideas sobreviven a futuros descubrimientos como si no, la trama del relato de la vida de acuerdo con la física ya está cogiendo forma. Y si ese relato resulta ser tan general como las investigaciones recientes sugieren, es posible que la vida sea común en el cosmos. Sin embargo, por emocionante que eso sea, una cosa es la vida y otra

muy distinta la vida inteligente. Encontrar microbios en Marte o en Europa, la luna de Júpiter, sería un descubrimiento monumental. Pero en tanto que seres pensantes, conversadores y creativos, todavía podríamos estar solos.

Entonces ¿cuál es el camino que lleva de la vida a la conciencia?

5

PARTÍCULAS Y CONCIENCIA

De la vida a la mente

En algún momento, entre las primeras células procariotas de hace cuatro mil millones de años y las noventa mil millones de neuronas del cerebro humano, entrelazadas en una red de cien billones de conexiones sinápticas, surgieron las facultades de pensar y sentir, amar y odiar, temer y anhelar, sacrificar y adorar, imaginar y crear; unas capacidades nuevas que producirían logros espectaculares, pero también indecible destrucción. «Todo comienza por la conciencia y nada vale nada sino por ella»[1], decía Albert Camus. Sin embargo, hasta hace pocos años, conciencia era una palabra poco grata para las ciencias duras. A los investigadores decadentes en el crepúsculo de sus carreras se les perdonaba que dirigiesen su atención al tema marginal de la mente, pero el objetivo de la investigación científica general era entender la realidad objetiva, y para muchos, y durante mucho tiempo, la conciencia no pertenecía a ella: la voz que parlotea dentro de mi cabeza solo se puede oír allí dentro.

Es una posición un tanto irónica. El «Cogito, ergo sum» de Descartes resume nuestro contacto con la realidad. Todo lo demás puede ser ilusión, pero pensar es la única cosa de la que hasta el más férreo escéptico puede estar seguro. Y pese al retruécano de Ambrose Bierce, «Pienso que pienso, luego pienso que existo»[2], si uno piensa, las razones para creer en la existencia son poderosas. Que a la ciencia no le importase la conciencia sería como darle la espalda a lo único con lo que todos podemos contar. De hecho, durante miles de años muchos han negado el carácter terminante de la muerte colgando de la conciencia la esperanza existencial. El cuerpo muere. Eso es obvio, evidente, innegable. Pero esa voz interior que nos parece persistente,

junto con los abundantes pensamientos, sensaciones y emociones que llenan cada uno de nuestros mundos subjetivos, nos habla de una presencia etérea que algunos conciben como algo que se sitúa más allá de los hechos básicos de la existencia física. *Atman*, ánima, alma inmortal, son muchos los nombres que ha recibido, pero todos connotan la creencia en que el yo consciente bebe de algo que sobrevive a la forma física, algo que trasciende a la ciencia mecanicista tradicional. La mente no es solo el hilo que nos sujeta a la realidad, sino también, quizá, el que nos sujeta a la eternidad.

Ahí se encuentra una pista más que nos revela por qué las ciencias duras se han resistido durante tanto tiempo a todo lo que tenga que ver con la conciencia. La reacción de la ciencia a los discursos sobre ámbitos que se encuentran fuera del alcance de la ley física es hacer un mohín de exasperación y luego volverse y regresar a toda prisa al laboratorio. Ese desdén representa una actitud científica dominante, pero también pone de manifiesto una laguna crítica en el relato científico. Todavía está por construir una explicación científica robusta de la experiencia consciente. Carecemos de un relato concluyente de cómo la conciencia manifiesta un mundo privado de visiones, sonidos y sensaciones. Todavía no podemos responder, o por lo menos no con plena fuerza, a quienes afirman que la conciencia se sitúa más allá de la ciencia convencional. Y no parece probable que podamos llenar esta laguna en un futuro cercano. Quienes han pensado en el pensar han comprendido que desentrañar la conciencia, explicar nuestros mundos interiores en términos puramente científicos, es uno de los retos más formidables a los que nos enfrentamos.

Isaac Newton prendió la llama de la ciencia moderna cuando desveló pautas regulares en las partes de la realidad que son accesibles a los sentidos humanos y las codificó en sus leyes del movimiento. En los siglos que han transcurrido desde entonces, hemos llegado a comprender que para ir más allá de Newton hay que desbrozar tres caminos distintos. Resulta necesario entender la realidad a escalas mucho más pequeñas que las que Newton consideró, un camino que nos ha llevado hasta la física cuántica, que explica el comportamiento de las partículas fundamentales y, entre muchas otras cosas, los procesos bioquímicos que subyacen a la vida. Es necesario entender también la realidad a escalas mucho más grandes que las que Newton consideró, un camino que nos ha conducido hasta la relatividad general, que explica la gravedad y, entre muchas otras cosas, la formación de las estrellas y los planetas esenciales para la aparición de la vida. Y para la tercera frontera, la más laberíntica de todas, resulta necesario entender la realidad a escalas

mucho más complejas que las consideradas por Newton, un camino que creemos que nos conducirá a una explicación de cómo grandes conjuntos de partículas pueden entrelazarse para producir la vida y generar la mente.

Newton hizo bien en enfocar su potencia intelectual en problemas altamente simplificados, ignorando, por ejemplo, la agitada estructura interna del Sol y los planetas para tratarlos como bolas sólidas. El arte de la ciencia, en el que Newton era maestro, consiste en hacer simplificaciones juiciosas que hagan tratable el problema, pero que al mismo tiempo retengan lo suficiente de su esencia como para que las conclusiones extraídas sean relevantes. La dificultad es que las simplificaciones que resultan eficaces para un tipo de problemas no tienen por qué serlo para otros. Si modelamos los planetas como bolas sólidas, podemos calcular sus trayectorias con facilidad y precisión. Si modelamos la cabeza como una bola sólida, lo que podamos aprender de la naturaleza de la mente no será tan esclarecedor. Pero deshacerse de aproximaciones infructuosas y dejar al descubierto el funcionamiento interno de un sistema con tantas partículas como el cerebro, que es un objetivo loable, exigiría el dominio de un nivel de complejidad muy lejos del alcance de los más sofisticados métodos matemáticos y computacionales de nuestros días.

Lo que ha cambiado en los últimos años es que hemos hallado maneras de acceder a características observables y mensurables de la actividad cerebral que, como mínimo, acceden a procesos que siempre acompañan a la experiencia consciente. Cuando los investigadores utilizan técnicas de imagen por resonancia magnética funcional para hacer un seguimiento meticuloso del flujo de sangre que sustenta la actividad neuronal, o insertan profundamente en el cerebro sondas que detectan impulsos eléctricos disparados por neuronas individuales, o usan electroencefalogramas para detectar ondas electromagnéticas que atraviesan el cerebro, y cuando los datos revelan patrones claros que reflejan tanto el comportamiento observado como los informes de la experiencia interior, se refuerzan considerablemente los argumentos a favor de una aproximación a la conciencia como fenómeno físico. De hecho, hay investigadores osados que, animados por estos impresionantes progresos, creen que ya ha llegado el momento de sentar las bases científicas de la experiencia consciente.

Conciencia y narración

Hace algunos años, durante un intercambio cortés pero encendido sobre el papel de las matemáticas en la descripción del universo, le contesté con énfasis al presentador de una tertulia nocturna de televisión que él no era más que un saco de partículas gobernadas por las leyes de la física. No lo dije en broma, aunque él al instante le sacó punta. («¡Eh! ¡Una manera genial de entrarle a alguien!»). Tampoco lo dije como burla, puesto que todo lo que fuese cierto del presentador lo sería también de mí. El comentario surgió más bien de mi profundo compromiso con el reduccionismo, que sostiene que si entendemos completamente el comportamiento de los ingredientes fundamentales del universo, podemos narrar una historia rigurosa y completa de la realidad. Si no disponemos todavía de un primer borrador de esta narración es porque todavía quedan por resolver muchos problemas en la vanguardia de la investigación, algunos de los cuales comentaremos enseguida. No obstante, puedo imaginar un futuro en el que los científicos sean capaces de proporcionar una articulación matemática completa de los procesos microfísicos fundamentales que subyacen a todo lo que ocurre en cualquier momento y lugar.

Hay algo reconfortante en esa posibilidad, algo que de un modo u otro reverbera con elegancia en el sentir de Demócrito desde hace dos mil quinientos años: «Por convención lo dulce, por convención lo amargo, por convención el color, cuando en realidad solo hay átomos y vacío»[3]. O sea, que todo surge de la misma colección de ingredientes gobernados por los mismos principios físicos. Y esos principios, como atestiguan varios cientos de años de observación, experimentación y elaboración de teorías, probablemente se lleguen a expresar mediante un puñado de símbolos dispuestos en una pequeña colección de ecuaciones matemáticas. «Eso» es un universo elegante[4].

Por potente que fuera una descripción así, no dejaría de ser un relato más entre los muchos que podemos contar. Gozamos de la capacidad de cambiar el enfoque, de restablecer la resolución, de implicarnos en el mundo de muy variadas maneras. Aunque una descripción reduccionista completa nos ofrecería un sólido cimiento científico, otras descripciones de la realidad, otros relatos, nos permiten vislumbrar aspectos que muchos consideran más relevantes por ser más cercanos a la experiencia. Para narrar algunos de esos

relatos se necesitan, como hemos visto, nuevos conceptos y un nuevo lenguaje. La entropía nos ayuda a explicar la historia de la aleatoriedad y la organización en grandes conjuntos de partículas, las que emanan del horno de la cocina o las que se condensan en estrellas. La evolución nos ayuda a contar la historia del azar y la selección en conjuntos en moléculas (vivas o no) que se replican, mutan y, poco a poco, se van adaptando a su entorno.

Un relato que para muchos es todavía más relevante es el que se centra en la conciencia. Abarcar pensamientos, emociones y recuerdos es abarcar el núcleo de la experiencia humana. Es también un relato que exige una perspectiva cualitativamente distinta de cualquiera de las que hemos adoptado hasta el momento. Entropía, evolución y vida pueden estudiarse «ahí fuera». Narramos sus historias en tercera persona. Somos testigos de sus historias y, si somos lo bastante diligentes, nuestra narración puede ser exhaustiva. Son historias grabadas en libros abiertos.

Un relato que incluya la conciencia es distinto. Un relato que penetre en las sensaciones interiores de imágenes o sonidos, de gozo o amargura, de comodidad o dolor, de serenidad o zozobra, tiene que contarse en primera persona. De este relato nos informa una voz interior de la conciencia que nos habla siguiendo un guion del que aparentemente cada uno de nosotros somos autores. No solo experimento un mundo subjetivo, sino que percibo de manera palpable que dentro de ese mundo controlo mis acciones. Sin duda, cualquier otra persona siente lo mismo de sus acciones. Qué importan las leyes de la física; pienso, luego controlo. Comprender el universo al nivel de la conciencia requiere un relato que pueda habérselas con una realidad subjetiva, por completo personal y aparentemente autónoma.

Para iluminar la conciencia nos enfrentamos, pues, a dos retos distintos, pero relacionados. ¿Puede la materia, por sí sola, producir las sensaciones que infunden conciencia? ¿Es posible que nuestro sentido de autonomía consciente no sea más que el resultado de la acción de las leyes de la física sobre la materia que constituye el cerebro y el cuerpo? A estas preguntas, Descartes respondió con una clara negación. Para él, la diferencia manifiesta entre mente y materia refleja una profunda división. El universo tiene sustancia física. El universo tiene sustancia mental. Lo físico puede afectar a lo mental y lo mental a lo físico, pero son cosas distintas. Dicho en lenguaje moderno, los pensamientos no están hechos de átomos y moléculas.

La posición de Descartes es tentadora. Me doy cuenta de que mesas y sillas, gatos y perros, hierbas y árboles son distintos de los pensamientos del interior de mi cabeza, y sospecho que cualquier otra persona confirmaría la

misma impresión. ¿Por qué las partículas que constituyen los elementos tangibles de la realidad externa y las leyes físicas que las rigen habrían de tener alguna relevancia para explicar mi mundo interior de la experiencia consciente? Por tanto, quizá debamos esperar que el conocimiento de la conciencia no sea simplemente un relato a un nivel superior, no sea solo un relato que dirige la mirada de afuera adentro, sino uno de un tipo fundamentalmente distinto, uno que requiera de una revolución conceptual a la altura de las protagonizadas por la física cuántica y la relatividad.

Me encantan las revoluciones intelectuales. No hay nada más emocionante que un descubrimiento que trastorne completamente la visión aceptada del mundo. Y en lo que sigue, comentaremos revueltas que, a decir de algunos investigadores de la conciencia, nos vamos a encontrar de frente. Sin embargo, por razones que pronto quedarán claras, yo sospecho que la conciencia es menos misteriosa de lo que parece. En sintonía con mi exclamación en aquel programa de televisión y, lo que es más importante, con una serie de investigadores que han dedicado su carrera profesional a responder estas preguntas, mi impresión es que algún día explicaremos la conciencia sin nada más que el conocimiento convencional de las partículas que constituyen la materia y de las leyes físicas que las gobiernan. Eso desataría una suerte de revolución al establecer una hegemonía casi ilimitada de las leyes físicas, que llegaría arbitrariamente lejos en el mundo objetivo de la realidad objetiva, y con igual profundidad en el mundo interior de la experiencia subjetiva.

En las sombras

No todas las funciones cerebrales inspiran tanta reverencia como la conciencia. De hecho, buena parte de la actividad neurológica se desenvuelve bajo la superficie de esta. Cuando admiramos una puesta de sol, nuestro cerebro procesa rápidamente los datos traídos por los billones de fotones que cada segundo excitan los fotorreceptores de las retinas, con suma diligencia interpola la imagen para rellenar los puntos ciegos (allí donde, en cada ojo, el nervio óptico se conecta con la retina para llevar los datos al núcleo geniculado lateral del cerebro y, de allí, a la corteza visual), compensa al instante los movimientos de los ojos y de la cabeza, corrige los fotones

bloqueados o dispersados por irregularidades oculares, pone cada imagen del derecho, fusiona las partes de cada imagen comunes a ambos ojos, y así tantas otras cosas, y sin embargo, mientras contemplamos plácidamente los últimos rayos de sol, somos felizmente inconscientes de todo lo que está ocurriendo detrás de los ojos. Algo muy parecido sucede cuando alguien lee estas líneas. La arquitectura de la conciencia le permite concentrarse en las ideas conceptuales que simbolizan las palabras y relegar el procesamiento de enormes cantidades de datos visuales y lingüísticos a funciones cerebrales que le pasan desapercibidas. Más innato aún, día tras día caminamos, hablamos, el corazón late, la sangre fluye, el estómago digiere, los músculos se flexionan, y tantas y tantas cosas ocurren sin que necesitemos prestarles la más mínima atención.

Que el cerebro está inundado de influyentes procesos que escapan a la introspección es una premisa con una larga historia que se ha expresado de múltiples maneras. Los textos védicos escritos hace tres mil años apelan a cierta idea del inconsciente, y las referencias se suceden a lo largo de los siglos, durante los cuales pensadores perspicaces han imaginado aromas en las cualidades mentales que son inaccesibles al paladar de la conciencia: san Agustín («Es angosta el alma para contenerse a sí misma. Pero ¿dónde puede estar lo que de sí misma no cabe en ella?»[5]), Tomás de Aquino («El alma no se conoce a sí misma por su esencia»[6]), William Shakespeare («Id al fondo de vuestro pecho, golpead allí y preguntad a vuestro corazón si acaso no conoce»[7]), Gottfried Leibniz («La música es el ejercicio aritmético oculto de una mente que no es consciente de que está calculando»[8]). También resultan intrigantes los procesos que «parecen» residir fuera del radar pero generan ecos accesibles al procesamiento consciente. Abundan las historias, por ejemplo, en las que la mente inconsciente resuelve problemas y entrega las soluciones sin que se le soliciten. Una de las más pintorescas relata el caso de un farmacéutico alemán, Otto Loewi, que durante la vigilia del Domingo de Pascua de 1921 se despertó brevemente y anotó una idea que le había sobrevenido en un sueño. Por la mañana, Loewi se levantó con una sensación abrumadora de que la anotación nocturna contenía una idea vital, pero por mucho que lo intentó no consiguió descifrarla. A la noche siguiente tuvo el mismo sueño, pero esta vez se acercó de inmediato al laboratorio y plasmó las directrices de lo soñado en un experimento para contrastar su antigua hipótesis de que los procesos centrales para la comunicación celular eran químicos y no eléctricos. El lunes ya había realizado el ensayo, y su éxito habría de valerle el premio Nobel[9].

La cultura popular tiende a entrelazar el funcionamiento «subterráneo» de la mente con las contribuciones de Sigmund Freud (pese a que varios científicos habían perseguido ideas parecidas años antes)[10] y con las corrientes profundas y cambiantes de los recuerdos, deseos, conflictos, fobias y complejos reprimidos que, a su entender, zarandean el comportamiento humano. La diferencia de peso en los tiempos actuales es que las especulaciones, presentimientos e intuiciones relacionadas con la vida de la mente tienen que confrontarse con datos que antes no estaban a nuestra disposición. Los investigadores han desarrollado métodos ingeniosos para atisbar por encima del hombro de la mente y medir la actividad cerebral que se esconde por debajo de la conciencia.

Algunos de los estudios más sorprendentes conciernen a pacientes que han perdido en mayor o menor medida alguna función neurológica. Un caso bien conocido es el que, a finales de la década de 1980, Peter Halligan y John Marshall documentaron en un sujeto, apodado «P. S»., que había sufrido daños cerebrales en el hemisferio derecho[11]. Como era de esperar para este tipo de deficiencia, P. S. no informaba de los detalles situados en el extremo izquierdo de las imágenes que se le mostraban. Afirmaba, por ejemplo, que dos dibujos de color verde oscuro de una casa eran idénticos aunque el lado izquierdo de una de ellas estaba siendo consumido por un incendio de color rojo. Sin embargo, cuando se le preguntaba cuál de las dos casas preferiría como hogar, P. S. señalaba siempre la casa que no se quemaba. Los investigadores argumentaron que si bien P. S. era incapaz de adquirir una percepción consciente del incendio, esa información había entrado subrepticiamente e influía en su decisión entre bambalinas.

Los cerebros sanos también desvelan su propia dependencia de influencias ocultas. Los psicólogos han establecido que por mucho que prestemos atención, una imagen mostrada en una pantalla durante menos de unos cuarenta milisegundos (intercalada entre imágenes que se muestran durante un tiempo algo más largo, conocidas como máscaras) no logran entrar en nuestra conciencia. No obstante, esas imágenes subliminales pueden influir en nuestras decisiones conscientes. La célebre afirmación de que un pico en el consumo de refrescos fue causado por fotogramas subliminales de «Beba Coca-Cola» que se mostraban en los cines es una leyenda urbana propagada a finales de la década de 1950 por un investigador de mercadotecnia en momentos bajos[12]. Pero algunos ingeniosos experimentos de laboratorio prueban de manera convincente la existencia de ciertos tipos de procesos mentales clandestinos[13]. Por ejemplo, imaginemos una pantalla en la que se

muestran velozmente números entre 1 y 9, y nuestra tarea consiste en clasificarlos con rapidez como mayores o menores de 5. Resulta que nuestro tiempo de reacción es más rápido cuando el número viene precedido de un destello subliminal de un dígito situado en el mismo lado del 5 que el número presentado (por ejemplo, cuando un 4 es precedido por un 3 subliminal). Al contrario, los tiempos de reacción son más lentos cuando el número viene precedido por un destello subliminal de un dígito situado en el lado opuesto del 5 respecto al número presentado (por ejemplo, cuando un 4 es precedido por un 7 subliminal[14]). Aunque uno no sea consciente de los brevísimos cameos numéricos, corren por nuestro cerebro e influyen en nuestra respuesta.

La conclusión es que nuestro cerebro coordina subrepticiamente todo un prodigio de regulación, funcionalidad y exploración de datos. Pero por extraordinarias que sean estas actividades cerebrales, no constituyen un misterio conceptual. El cerebro envía y recibe a gran velocidad por las fibras nerviosas señales que le permiten controlar procesos biológicos y generar respuestas comportamentales. Para desentrañar las vías neuronales precisas y los detalles fisiológicos que subyacen a esas funciones y comportamientos, los científicos se enfrentan a la grandiosa empresa de mapear vastos territorios con una enorme densidad de complejos circuitos biológicos con un nivel de precisión muy por encima de lo que hasta el momento podemos hacer. Aun así, todo lo que vamos aprendiendo sugiere que por difícil que resulte, por ingentes que sean las reservas de creatividad y diligencia que se requieren, todo nos lleva a creer que las estrategias familiares de la ciencia prevalecerán.

Y de no ser por una incordiante cualidad de la mente, ahí acabaría todo. Pero al mirar más allá de las funciones de esta y considerar en cambio sus sensaciones (la experiencia interior que identificamos como la esencia del ser humano), algunos investigadores han llegado a un pronóstico distinto y mucho menos optimista acerca de la capacidad de la ciencia tradicional para iluminarnos. Esto nos lleva a lo que algunos llaman el «problema difícil» de la conciencia.

El problema difícil

En una carta a Henry Oldenburg, Isaac Newton, uno de los más prolíficos escritores epistolares de los años formativos de la ciencia moderna, observó:

> Determinar de manera más absoluta qué es la luz […] y por qué medio o acciones produce en nuestras mentes los fantasmas de los colores no es tarea sencilla. Y no mezclaré conjeturas con certezas[15].

Newton se esforzaba por explicar una de las experiencias más comunes: la sensación interior de uno u otro color. Pensemos en un plátano. Mirarlo y determinar que es amarillo no es nada del otro mundo. Con la aplicación apropiada, hasta el móvil puede hacerlo. Sin embargo, que sepamos, cuando el móvil nos dice que el plátano es amarillo, no tiene una impresión interior del amarillo. No tiene una sensación interior del amarillo. No ve el amarillo con el ojo de la mente. Nosotros sí. Newton también. Su problema era entender cómo demonios lo hacemos.

El problema es relevante mucho más allá de los «fantasmas» mentales del amarillo, el azul o el verde. Mientras escribo estas palabras, picoteo unas palomitas de maíz y oigo una música suave de fondo, siento todo un abanico de experiencias internas: presión en la yema de los dedos, un regusto salado, las magníficas voces de Pentatonix, un monólogo mental mientras pienso en cómo acabar esta frase. El universo interior del lector acoge estos mundos, que tal vez escuche narrados por la voz interior de la mente al mismo tiempo que le distrae, quizá, el último trozo de chocolate que queda en la nevera. La cuestión es que nuestras mentes albergan toda una diversidad de sensaciones internas, pensamientos, emociones, recuerdos, imágenes, deseos, sonidos, olores y tantos otros, todos las cuales forman parte de lo que entendemos por conciencia[16]. Como con Newton y el plátano, lo difícil es determinar cómo crean y sostienen nuestros cerebros estos intensos mundos de experiencias subjetivas.

Para acabar de comprender la profundidad de este enigma, supongamos que el lector está dotado de visión sobrehumana que le permite atisbar en mi cerebro y ver cada una de sus aproximadamente mil billones de billones de partículas (electrones, protones y neutrones) moviéndose de manera agitada y chocando entre ellas, atrayéndose y repeliéndose, fluyendo y dispersándose[17]. A diferencia de las grandes colecciones de partículas que salen del horno con el aroma del pan o que se concentran en una estrella, las partículas que conforman mi cerebro están dispuestas de acuerdo a un patrón altamente organizado. Aun así, si nos centramos en una cualquiera,

descubriremos que interactúa con otras por medio de las mismas fuerzas, descritas por las mismas matemáticas, sin importar que esa partícula esté suspendida en el aire de la cocina, en la corona de la Estrella Polar o dentro de mi corteza prefrontal. Pero dentro de esa descripción matemática, confirmada por décadas de datos obtenidos mediante colisionadores de partículas y potentes telescopios, no hay absolutamente la menor pista que anuncie las experiencias interiores que de algún modo generan esas partículas. ¿Cómo puede una colección de partículas sin mente ni pensamientos ni emociones organizarse y producir sensaciones interiores de color o sonido, de júbilo o asombro, de confusión o sorpresa? Las partículas poseen masa, carga eléctrica y un puñado de características parecidas (cargas nucleares, que son versiones más exóticas de las cargas eléctricas); pero todas esas cualidades parecen estar totalmente desconectadas de cualquier cosa que se parezca en lo más mínimo a una experiencia subjetiva. Entonces ¿cómo consigue un torbellino de partículas en el interior de la cabeza, pues solo eso es el cerebro, crear impresiones, sensaciones y sentimientos?

El filósofo Thomas Nagel nos brindó un evocador relato de esta brecha explicativa[18]. ¿Cómo debe ser, se preguntaba, ser un murciélago? Imaginémoslo: suspendidos en el aire, sobrevolamos un oscuro paisaje y emitimos un incesante charloteo de clics que vuelven a nosotros como ecos desde árboles, rocas e insectos y nos permiten mapear nuestro entorno. Gracias al sonido reflejado, nos percatamos de que delante de nosotros hay un mosquito que se dirige a la izquierda, nos abalanzamos sobre él y disfrutamos del magro bocado. Como nuestra manera de interactuar con el mundo es profundamente distinta, nuestra imaginación no consigue llevarnos mucho más adentro del mundo interior del murciélago. Aunque obtuviésemos información exhaustiva sobre la física, química y biología fundamentales que hacen de un murciélago un murciélago, seguiría pareciéndonos que nuestra descripción no logra acercarnos a la experiencia subjetiva, en «primera persona», de un murciélago. Por muy detallado que sea nuestro conocimiento material, el mundo interior del murciélago queda fuera de nuestro alcance.

Lo mismo podemos decir de cada uno de nosotros. Cualquier otra persona es también un enjambre de partículas que interactúan. También yo. Y aunque soy capaz de entender cómo las partículas de otro individuo pueden llevarlo a decir que ha visto el color amarillo (basta con que las partículas del tracto vocal, la boca y los labios coordinen sus movimientos para producir ese comportamiento externo), me resulta mucho más difícil entender cómo las partículas le proporcionan la experiencia interior subjetiva del amarillo.

Aunque entiendo cómo sus partículas pueden hacerle sonreír o fruncir el ceño (como antes, basta con que las partículas coordinen apropiadamente sus movimientos), no veo la manera de comprender cómo las partículas producen una sensación interior de felicidad o tristeza. De hecho, aunque tengo acceso directo a mi propio mundo interior, me siento igual de perdido cuando intento comprender cómo surge ese mundo de los movimientos e interacciones de mis propias partículas.

Naturalmente, me sentiría igualmente impedido si intentase explicar cualquier otra cosa en términos tan radicalmente reduccionistas, desde los tifones del Pacífico a los volcanes en erupción. Pero el reto que plantean estos acontecimientos, y todo un mundo repleto de ejemplos como estos, no va más allá de describir la dinámica compleja de un número extraordinariamente grande de partículas. Si pudiésemos superar el obstáculo tecnológico, lo resolveríamos[19]. Y eso porque no hay sensación interior de «cómo es ser» un tifón o un volcán. Estos, que sepamos, no gozan de mundos subjetivos de experiencia interior. No hay relatos en primera persona que perder. Pero para cualquier cosa consciente, eso es precisamente lo que le falta a nuestra descripción subjetiva, en tercera persona.

En 1994 en Tucson, David Chalmers, un joven filósofo australiano con una melena que le bajaba de los hombros, subió a la tarima durante un congreso anual sobre la conciencia y describió este déficit como el «problema difícil» de esta. Y no porque el problema «fácil», que es el de entender la mecánica de los procesos cerebrales y sus papel en la formación de recuerdos, la respuesta a estímulos y el moldeado de comportamientos, sea realmente sencillo. Lo que ocurre es que somos capaces de concebir la forma que puede tener una solución a ese tipo de problemas, y articular un enfoque a partir de primeros principios sobre partículas o de estructuras más complejas, como las células o los nervios, que parece coherente. El desafío que supone concebir una solución como esta para la conciencia es lo que motivó el comentario de Chalmers. A su entender, no solo carecemos de puente entre las partículas sin mente y la experiencia mental, sino que fracasaremos si intentamos tenderlo ayudados por los planos del reduccionismo, es decir, a partir de las partículas y leyes que constituyen la base fundamental de la ciencia tal como la conocemos.

El comentario de Chalmers pulsó una cuerda de sonido armónico para unos, disonante para otros, pero cuyo eco no ha dejado de sentirse desde entonces en la investigación sobre la conciencia.

Algo pasa con Mary

Es fácil mostrarse frívolo ante el problema difícil. En el pasado, mi propia respuesta quizá lo pareciera. Cuando se me preguntaba al respecto, solía decir que la experiencia consciente no es más que lo que se siente cuando en el cerebro se produce cierto tipo de procesamiento de información. Pero como la cuestión central consiste en explicar justamente cómo puede producirse que algo «se sienta», la respuesta rechaza demasiado pronto el problema difícil como si no fuera difícil o siquiera fuera un problema. Más amablemente, es una respuesta que se alinea con la opinión, muy extendida, de que tenemos una opinión demasiado elevada de lo que es el pensamiento. Aunque algunos aficionados recalcitrantes al problema difícil afirman que para entender la conciencia necesitamos introducir conceptos ajenos a la ciencia convencional, otros, los «fisicalistas», anticipan que los métodos científicos tradicionales, apropiadamente amoldados y aplicados de manera creativa, pero apelando únicamente a las propiedades de la materia, bastarán para afrontar el problema. La perspectiva fisicalista resume con certeza la opinión que yo mismo he sostenido durante mucho tiempo.

Con los años, sin embargo, y a medida que he ido reflexionando de manera más cuidadosa sobre la cuestión de la conciencia, he pasado por algunos momentos significativos de duda. El de más calado se produjo cuando me encontré con la influyente argumentación que el filósofo Frank Jackson presentó una década antes de que se etiquetase el problema difícil[20]. Jackson cuenta una historia sencilla que, ligeramente dramatizada, dice algo así. Imaginemos que en el futuro lejano hay una chica brillante, Mary, que sufre una profunda ceguera a los colores. Desde el nacimiento, todo su mundo se le ha aparecido solo en blanco y negro. Su trastorno tiene intrigados a los más renombrados doctores, y Mary decide que le corresponde a ella sola desentrañarlo. Empujada por el sueño de curar su deficiencia, Mary se sumerge en años de intenso estudio, observación y experimentación hasta convertirse en el mejor neurocientífico que el mundo haya visto y alcanzar una meta que siempre había eludido al género humano: consigue desvelar hasta el último detalle de la estructura, función, fisiología, química, biología y física del cerebro. Domina absolutamente todo lo que puede saberse sobre el funcionamiento del cerebro, tanto de su organización global como de sus procesos microfísicos. Comprende todos los disparos neuronales y las

cascadas de partículas que se producen cuando nos maravillamos ante un bello cielo azul, disfrutamos de una suculenta ciruela o nos dejamos llevar por la Tercera Sinfonía de Brahms.

Con su logro, Mary consigue encontrar la cura para su déficit visual y se somete a un procedimiento quirúrgico para corregirlo. Meses más tarde, cuando los médicos están a punto de quitarle los vendajes, la joven se prepara para absorber todo un nuevo mundo. Situada frente a un ramo de rosas, abre lentamente los ojos. He aquí la pregunta: ¿aprenderá Mary algo nuevo de esta primera experiencia del color rojo? Al poseer por fin la experiencia interior del color, ¿lo entenderá de una nueva manera?

Cuando uno revive esta historia en su mente, parece absolutamente obvio que la primera vez que Mary experimenta la sensación interior del rojo se sentirá abrumada. ¿Sorprendida? Sí. ¿Emocionada? Sin duda. ¿Conmovida? Profundamente. Parece lógico que esta primera experiencia directa del color ampliará su comprensión de la percepción humana y de la respuesta interior que puede generar. A partir de esta intuición tan extendida, Jackson nos anima a considerar su implicación. Mary había llegado a dominar todo lo que se podía saber sobre el funcionamiento físico del cerebro. Pese a ello, una sola exposición al color basta para que, aparentemente, amplíe ese conocimiento. Ha adquirido conocimiento de la experiencia consciente que acompaña a la respuesta del cerebro al color rojo. ¿La conclusión? «El conocimiento perfecto del funcionamiento físico del cerebro deja algo fuera». No logra exponer o explicar las sensaciones subjetivas. Si el conocimiento físico hubiese sido exhaustivo, al quitarse las vendas Mary se habría encogido de hombros.

La primera vez que leí esta historia sentí una súbita empatía con su protagonista, como si también yo me hubiese sometido a una cirugía correctora para abrir una ventana, antes oscura, a la naturaleza de la conciencia. De repente, mi irreflexiva confianza en que los procesos físicos que ocurren en el cerebro «son» conciencia, que la conciencia «es» la sensación de esos procesos, se tambaleó. Mary poseía todo el conocimiento posible sobre los procesos físicos que ocurren en el cerebro y, sin embargo, en el escenario planteado, parecía claro que ese conocimiento todavía era insuficiente. Lo que eso sugería era que, en lo que atañe a la experiencia consciente, los procesos físicos son parte de la historia, pero no son toda la historia. Cuando apareció el artículo de Jackson, mucho antes de que yo lo encontrase, también los expertos se sintieron interpelados y, en las décadas que siguieron, Mary suscitó muchas respuestas.

El filósofo Daniel Dennett nos pide que pensemos de verdad en la implicación del conocimiento exhaustivo de Mary sobre los hechos físicos. Su punto de vista es que el concepto de conocimiento físico exhaustivo nos es tan extraño que subestimamos enormemente el poder explicativo que nos proporcionaría. Dennett argumenta que, armados con un conocimiento tan amplio, desde la física de la luz a la bioquímica de los ojos y la neurociencia del cerebro, Mary «podría» discernir la sensación física del rojo mucho antes de experimentarla[21]. Cuando le quitan las vendas, Mary puede responder a la belleza de las rosas rojas, pero ver su color rojo tan solo confirmaría sus expectativas. Los filósofos David Lewis[22] y Laurence Nemirow[23] adoptan una posición distinta: proponen que Mary adquiere una habilidad nueva (la de identificar, recordar e imaginar la experiencia interior del rojo), pero que eso no constituye un hecho nuevo que se sitúa fuera de su anterior dominio del conocimiento. Cuando le quitan las vendas, Mary tal vez no se encoge de hombros, pero el «guau» que suelta tiene que ver solamente con el gozo de una nueva manera de pensar en un conocimiento que ya posee. Incluso el propio Jackson argumenta ahora en contra de su opinión original, que ha cambiado tras años de contemplación de Mary. Estamos tan acostumbrados a aprender cosas sobre el mundo por medio de la experiencia directa, como cuando aprehendemos cómo se siente el rojo al ver el rojo, que de forma tácita suponemos que estas experiencias proporcionan el único medio de adquirir ese conocimiento. Para Jackson, eso no está justificado. Aunque el proceso de aprendizaje de Mary no nos resulte familiar, puesto que se fundamenta en el razonamiento deductivo cuando todos nosotros recurrimos a la experiencia directa, su dominio total del conocimiento físico le permitiría determinar cómo es ver el rojo[24].

¿Quién tiene razón? ¿El Jackson original y los seguidores de su primer escarceo con esta cuestión? ¿O el último Jackson y todos aquellos que están convencidos de que después de ver las rosas Mary no aprende nada nuevo?

Es mucho lo que nos jugamos. Si la conciencia puede explicarse a partir del conocimiento de cómo las fuerzas físicas del mundo actúan sobre sus constituyentes materiales, nuestro objetivo será determinar cómo. Si no es así, nuestro objetivo será mucho más amplio. Tendremos que determinar los conceptos y procesos nuevos necesarios para entender la conciencia, un viaje que casi con seguridad nos llevará mucho más allá de los límites actuales de la ciencia.

Históricamente, hemos navegado con confianza por las aguas turbulentas de la intuición humana identificando consecuencias contrastables de las

perspectivas en conflicto. Hasta el momento, nadie ha propuesto un experimento, una observación o un cálculo que pueda dirimir de una vez por todas las preguntas que plantea la historia de Mary, o que, de manera más ambiciosa, revele la fuente de la experiencia interior. En su mayor parte, las consideraciones que usamos para juzgar esas perspectivas, y que son mínimamente aceptables, son la plausibilidad y el atractivo intuitivo, unas medidas flexibles que, como veremos, dejan sitio para una diversa colección de puntos de vista.

Una historia de dos historias

Las estrategias para explicar la conciencia se explayan sobre un impresionante paisaje de ideas. En los extremos están las posiciones que o bien desestiman la conciencia porque la consideran una ilusión («eliminativismo»), o declaran que es la única cualidad real del mundo («idealismo»). Entre estos extremos encontramos todo un espectro de propuestas. Algunas actúan dentro de los confines del pensamiento científico tradicional, otras se cuelan por los resquicios del actual conocimiento científico, y aún otras añaden algo más a las cualidades que desde hace mucho tiempo creemos que definen la realidad. Dos breves relatos presentan estas propuestas dentro de un contexto histórico.

Si pudiéramos acercar el oído a las discusiones que se entablaban en los círculos biológicos durante los siglos XVIII y XIX, estaríamos familiarizados con el «vitalismo», un concepto que abordaba lo que podríamos calificar de «problema difícil» de la vida: si los ingredientes fundamentales del mundo son inanimados, ¿cómo es posible que algunos conjuntos de esos ingredientes estén vivos? La respuesta del vitalismo, franca y escueta, era que esos conjuntos no podían estar vivos. Al menos no por sí mismos. El vitalismo proponía que el ingrediente que faltaba era una chispa no física, una fuerza vital que dotaba a la materia inanimada de la magia de la vida.

Si durante el siglo XIX nos hubiéramos movido por los círculos físicos, habríamos oído hablar con excitación de la electricidad y el magnetismo en los tiempos en que Michael Faraday y otros se sumergían cada vez más profundamente en este misterioso dominio. Una de las perspectivas que habríamos encontrado argumentaba que estos nuevos fenómenos podían

explicarse en el marco de la ciencia mecanicista estándar que nos había legado Isaac Newton. Dar con la ingeniosa combinación de líquidos fluyentes y minúsculas tuercas y ruedas dentadas responsables de los nuevos fenómenos podía ser un desafío, pero los cimientos para entenderlos ya estaban asentados. Ante la esperada idoneidad de la argumentación científica convencional, podríamos calificarlo de «problema fácil» de la electricidad y el magnetismo.

La historia ha revelado que las expectativas descritas en cada uno de estos relatos estaban mal encaminadas. Con la perspectiva de la que gozamos dos siglos más tarde, el enigma cuasimístico que entonces suscitaba la vida ha languidecido. Aunque todavía carecemos de un conocimiento completo de su origen, el consenso científico casi universal es que no necesitó ninguna chispa mágica. Todo lo que hizo falta fueron partículas configuradas en una jerarquía de estructuras (átomos, moléculas, orgánulos, células, tejidos, etc.). Toda la evidencia nos lleva a pensar que el marco actual de la física, la química y la biología es más que suficiente para explicar la vida. El problema difícil, aunque no cabe duda que arduo, se clasifica ahora como fácil.

En cuanto a la electricidad y el magnetismo, los datos recogidos con la ayuda de meticulosos experimentos obligaron a los científicos a buscar más allá de las características de la realidad física que enseñaban los libros de texto antes de 1800. El conocimiento existente dio paso a toda una nueva cualidad física de la materia (la carga eléctrica) en respuesta a todo un nuevo tipo de influencia (campos eléctricos y magnéticos que llenan el espacio), descrita por todo un nuevo conjunto de ecuaciones (veinte, en la formulación original) desarrolladas por James Clerk Maxwell. Aunque se resolvió, el problema «fácil» de la electricidad y el magnetismo resultó ser difícil[25].

Muchos investigadores imaginan que el relato del vitalismo volverá a repetirse en el caso de la conciencia: a medida que ahondemos en nuestro conocimiento del cerebro, el problema difícil de esta se irá desvaneciendo. Aunque todavía misteriosa, la experiencia interior pasará poco a poco a verse como una consecuencia directa de las actividades fisiológicas del cerebro. Lo que nos falta es un dominio absoluto del funcionamiento interno del cerebro, no una nueva variedad de sustancia de la mente. Algún día, de acuerdo con esta perspectiva fisicalista, la gente se sonreirá al recordar cómo en otro tiempo investimos la conciencia de tan apasionado pero inmerecido misterio.

Otros piensan que es el relato del electromagnetismo el que nos proporciona un modelo relevante para la conciencia. Cuando nuestro conocimiento del mundo se enfrenta a hechos desconcertantes, es natural que

intentemos incorporarlos al marco científico existente. Pero algunos hechos pueden no encajar en los moldes existentes. La conciencia, según estos pensadores, está repleta de hechos de este tipo. Si esta perspectiva resulta ser correcta, para comprender la experiencia subjetiva necesitaremos rehacer de manera sustancial el campo de juego intelectual, con profundas repercusiones sobre preguntas que van mucho más allá de la mente.

Una de las propuestas más radicales de esta propuesta es la que nos ofrece David Chalmers, el mismísimo Sr. Problema Difícil.

Teorías del todo

Convencido de que la conciencia no puede emerger de un torbellino de partículas sin mente, Chalmers nos anima a tomarnos muy en serio el relato del electromagnetismo. Del mismo modo que los físicos del siglo XIX afrontaron con coraje la futilidad de casar de mala manera unas explicaciones forzadas de los fenómenos del electromagnetismo con la ciencia convencional de su tiempo, hoy necesitamos el mismo coraje para reconocer que solo podremos esclarecer el fenómeno de la conciencia si miramos más allá de las cualidades físicas conocidas.

Pero ¿cómo? Una posibilidad, simple y audaz, es que las propias partículas individuales estén dotadas de un atributo innato de conciencia (llamémoslo «protoconciencia» para no imaginar electrones entusiasmados o quarks malhumorados), que no puede describirse en función de otra cualidad más fundamental. Es decir, nuestra descripción de la realidad debe ampliarse para incluir una cualidad subjetiva intrínseca e irreducible que infunde cada ingrediente material elemental de la naturaleza. Esta sería la cualidad de la materia que siempre hemos pasado por alto, y por eso no hemos conseguido explicar la base física de la experiencia consciente. ¿Cómo puede un torbellino de partículas sin mente crear la mente? No puede. Para crear una mente consciente necesitamos un torbellino de partículas con mente. Al juntar sus cualidades protoconscientes, una gran colección de partículas puede producir la familiar experiencia consciente. La propuesta, pues, es que las partículas estarían dotadas de una bien estudiada colección de propiedades físicas (masa, carga eléctrica, cargas nucleares y espín mecánico cuántico), pero también de una cualidad de protoconciencia que hasta ahora habíamos

ignorado. Al revitalizar creencias pampsíquicas con raíces históricas que se remontan a la antigua Grecia, Chalmers contempla la posibilidad de que la conciencia sea relevante para todo aquello que está hecho de partículas, ya se trate del cerebro de un murciélago o de un bate de béisbol.

Si el lector se pregunta qué es realmente la protoconciencia o cómo se infunde en una partícula, su curiosidad es loable, pero no es una cuestión que pueda responder ni Chalmers ni nadie. No obstante, resulta útil examinar estas preguntas dentro de un contexto. Si alguien me preguntase lo mismo sobre la masa o la carga eléctrica, lo más probable es que se quedase igual de insatisfecho. Yo no sé qué es la masa. Ni tampoco qué es la carga eléctrica. Lo que sí sé es que la masa produce y responde a una fuerza gravitatoria, y que la carga eléctrica produce y responde a una fuerza electromagnética. Así pues, aunque no puedo decir qué «son» esas cualidades de las partículas, sí soy capaz de decir qué «hacen». De modo análogo, tal vez los investigadores no puedan definir qué es la protoconciencia pero sí consigan desarrollar una teoría de qué hace, de cómo produce y responde a la conciencia. En el caso de las influencias gravitatorias y electromagnéticas, toda preocupación de que se haya sustituido una definición intrínseca por acción y respuesta mediante un arte de birlibirloque intelectual se ve aliviada, en la mayoría de los investigadores, por las predicciones espectacularmente precisas que obtenemos con nuestras teorías matemáticas de estas dos fuerzas. Quizá algún día dispongamos de una teoría matemática de la protoconciencia que pueda hacer predicciones igual de buenas. Por el momento no es así.

Por extraño que todo esto parezca, Chalmers argumenta que su enfoque se sitúa limpiamente dentro de unos límites de la ciencia bien definidos. Durante siglos, los científicos se han centrado de manera exclusiva en el despliegue objetivo de la realidad, y con este como meta han desarrollado ecuaciones que explican de maravilla los datos experimentales y observacionales. Lo que Chalmers sugiere es que hay otros datos, los de la experiencia interior, y cabe pensar que también otras ecuaciones que capten los patrones y regularidades de este dominio interior. De ser así, la ciencia convencional explicaría los datos exteriores, mientras que la ciencia de la nueva era explicaría los datos interiores.

Por decirlo de un modo ligeramente distinto, durante muchos años se ha mantenido en pie un movimiento, que suele atribuirse al físico John Wheeler (célebre por popularizar el término «agujeros negros»), que ve la información como la más fundamental de todas las monedas físicas. Para describir el estado del mundo ahora, proporcionamos información que especifica la

configuración de todas las partículas danzarinas y todos los ondulantes campos que impregnan el espacio. Las leyes de la física toman esos datos como entrada y producen como salida la información que define el estado del mundo en el futuro. Dentro de este marco, la física se ocupa del procesamiento de información.

Si usamos este lenguaje, la proposición de Chalmers es que toda información tiene dos caras. De un lado está su calidad objetiva, la que es accesible en tercera persona y que durante cientos de años ha estudiado la física convencional. Pero habría también una cualidad subjetiva, accesible solamente en primera persona, que la física todavía no ha tomado en consideración. Una teoría completa de la física tendría que englobar no solo la información accesible desde el exterior, sino también la interior, y necesitaría leyes que describieran la evolución dinámica de cada clase. El procesamiento de la información interior proporcionaría el fundamento físico de la experiencia consciente.

El sueño de Einstein de una teoría unificada de la física, de una teoría que pueda describir todas las partículas y fuerzas de la naturaleza dentro de un único formalismo matemático, ha recibido el apelativo de teoría del todo. Esta descripción, desafortunadamente ampulosa, se aplica con frecuencia a mi propio campo de estudio, la teoría de cuerdas, lo cual explica por qué se me pregunta tan a menudo acerca de mis opiniones sobre la conciencia. Al fin y al cabo, la conciencia parece que debería encajar cómodamente en una teoría que pueda explicarlo «todo». Sin embargo, como no me canso de repetir a quienes me lo preguntan, una cosa es comprender la física de las partículas elementales y otra muy distinta valerse de eso para comprender la mente humana. Construir el aparato científico que enlace escalas tan dispares, tanto en tamaño como en complejidad, es algo que se cuenta entre nuestros más arduo retos científicos. No obstante, si Chalmers tuviera razón, la conciencia entraría a formar parte de la explicación científica desde la base, en el nivel de las ecuaciones fundamentales y los constituyentes primitivos. Y eso significa que algún día podríamos gozar de un conocimiento que incorpore desde el mismo principio las caras exterior e interior del procesamiento de información, los procesos físicos objetivos y las experiencias conscientes subjetivas. «Eso» sí sería una teoría unificada. Yo seguiría oponiéndome a la locución «teoría del todo» (diría que a los científicos todavía les costaría predecir qué voy a desayunar mañana). En todo caso, un conocimiento así sería revolucionario.

¿Es esta la dirección correcta? Me encantaría que lo fuese. Nos situaría en la frontera de todo un nuevo territorio de la realidad que aguarda a ser explorado. Pero como cabe suponer, es mucho el escepticismo de que, en sus esfuerzos por hallar la fuente de la conciencia, la ciencia haya de desplazarse a tierras tan exóticas. El famoso adagio de Carl Sagan de que las afirmaciones extraordinarias exigen indicios extraordinarios es una guía apropiada. Disponemos «ya» de una abrumadora cantidad de indicios de algo extraordinario (nuestras experiencias interiores), pero muchos menos indicios convincentes de que esas experiencias se encuentren fuera del alcance de las explicaciones que puede ofrecer la ciencia convencional.

Nuestro conocimiento sería más profundo si pudiéramos identificar las condiciones físicas necesarias para generar experiencias subjetivas, y esa es una de las metas centrales de la teoría de la conciencia que consideraremos a continuación.

La mente integra información

Que el cerebro es un húmedo y almenado manojo de células que se ocupan de procesar información nadie lo discute. Escáneres cerebrales y exámenes invasivos han dejado claro que distintas partes del cerebro se especializan en procesar distintos tipos de información (óptica, auditoria, olfativa, lingüística, etc.).[26] Sin embargo, el procesamiento de información no basta para captar las cualidades que distinguen al cerebro. Son muchos los sistemas físicos que procesan información, desde el ábaco a un termostato o un ordenador, y si nos tomamos a pecho la perspectiva de Wheeler, en cierto sentido todo sistema físico puede concebirse como un procesador de información. Entonces ¿qué distingue la clase de procesamiento de información que da origen a la conciencia? Esta es una de las preguntas que guían al psiquiatra y neurocientífico Giulio Tononi, a quien se ha unido en su búsqueda el neurocientífico Christof Koch, y conjuntamente han desarrollado un enfoque conocido como teoría de la información integrada[27].

Para hacernos una idea de la teoría, imaginemos que alguien nos ofrece un Ferrari rojo nuevo. Con independencia de si nos gustan o no los coches de gama alta, el encuentro estimula nuestro cerebro con una gran cantidad de información sensorial. La información que expresa las cualidades visuales,

táctiles y olfativas del coche, junto a connotaciones más abstractas, desde su potencia en la carretera a asociaciones con el lujo y la riqueza, se entrelazan de inmediato en una única experiencia cognitiva. Esta es una experiencia cuyo contenido de información Tononi calificaría de «altamente integrado». Incluso si nos centramos en el color del coche, nos percatamos de que nuestra experiencia no es la de un Ferrari sin color que nuestra mente luego pinta de rojo. Ni tampoco la de un entorno rojo abstracto que nuestra mente luego moldea en la forma de un Ferrari. Aunque la información de la forma y la información del color activan distintas partes de la corteza visual, nuestras experiencias conscientes de la forma y color del Ferrari son inseparables. Las experimentamos como una sola. Esta es, para Tononi, una cualidad intrínseca de la conciencia: la información hilvanada en la experiencia consciente está bien cosida.

Una segunda cualidad intrínseca de la conciencia es que el abanico de cosas que somos capaces de retener en la mente es enorme. Desde una aturdidora variedad de experiencias sensoriales a los caprichos de la fantasía o la planificación abstracta, el pensamiento, la preocupación o la anticipación, nuestro repertorio mental es prácticamente ilimitado. Eso significa que cuando nuestra mente se enfoca en una experiencia consciente particular, como el Ferrari rojo, esta queda altamente diferenciada de la gran mayoría de las otras experiencias mentales que podríamos tener en ese momento. La propuesta de Tononi eleva estas observaciones a una caracterización definitoria: «La conciencia es información altamente integrada y altamente diferenciada».

La mayor parte de la información carece de estas cualidades. Tomemos una fotografía de un Ferrari rojo y consideremos el archivo digital producido. Para simplificar, olvidémonos de detalles como la compresión de la imagen e imaginemos en cambio que el archivo es una matriz de números cuyos valores registran la información del color y brillo de cada píxel de la imagen. Estos números están generados por fotodiodos de la cámara que responden a la luz reflejada en cada punto de la superficie del coche. ¿Hasta qué punto está integrada esta información? Como la respuesta de cada diodo es independiente de la de los otros (no hay entre ellos comunicación ni vínculo alguno) la información del archivo digital está totalmente compartimentada. Podríamos guardar el dato de cada píxel en un archivo distinto y el contenido total de información no se vería alterado. Por consiguiente, no hay ningún tipo de integración de los datos. ¿Hasta qué punto está diferenciada la información en el archivo digital? Aunque la diversidad de imágenes que

pueden guardarse en un archivo de una cámara digital es enorme, el contenido de información está restringido a una matriz fija de números independientes. Eso es todo. Un archivo fotográfico digital no está preparado para reflexionar sobre la ética de la pena de muerte o esforzarse por demostrar el último teorema de Fermat. En este sentido, el contenido de información es extremadamente limitado, lo que significa que la cámara no puntúa muy alto en la diferenciación de los datos.

Así pues, a medida que nuestro cerebro construye una representación mental, su contenido de información rápidamente se torna altamente integrado y altamente diferenciado, mientras que cuando la cámara construye una fotografía digital, su información no adquiere ninguna de estas características. Esta es, según Tononi, la razón de que nosotros tengamos una experiencia consciente del Ferrari y la cámara digital no.

Con el propósito de hacer estas consideraciones cuantitativas, Tononi ha propuesto una fórmula que asigna un valor numérico a la información contenida en un sistema dado, que suele denotarse φ, de tal modo que los valores altos de φ indican una mayor diferenciación y una integración más profunda, y, por consiguiente, según la teoría, un nivel superior de conciencia. Esta aproximación presenta, pues, un continuo que se extiende desde los sistemas simples, con menos integración y diferenciación de la información, que pueden experimentar formas rudimentarias de conciencia, pasando por los sistemas más complejos como nosotros mismos, con la suficiente integración y diferenciación para producir el nivel de conciencia que nos es familiar, hasta la posibilidad de aún otros sistemas cuyas capacidades informacionales, y por tanto su experiencia consciente, supere las nuestras.

Como en el enfoque de Chalmers, la teoría de Tononi tiene tintes pampsíquicos. Nada en su propuesta está de manera intrínseca vinculado a una estructura física particular. Nuestra experiencia de la conciencia reside en un cerebro biológico, pero para Tononi y su matemática, un valor de φ suficientemente elevado sería consciente tanto si está contenido en sinapsis neuronales como en estrellas de neutrones. Para algunos, como el científico de la computación Scott Aaronson, esto deja la proposición abierta a lo que considera un ataque devastador. Los cálculos de Aaronson muestran que si vinculamos ingeniosamente puertas lógicas simples (los conmutadores electrónicos más básicos), la red resultante puede alcanzar valores de φ tan grandes como uno desee, a la altura de los valores del cerebro humano o superiores[28]. De acuerdo con esta teoría, la red de conmutadores sería consciente. Y esa es una conclusión que Aaronson (y la intuición de la

mayoría de la gente) considera absurda. ¿Qué responde Tononi? Que por extraña y poco familiar que nos resulte la conclusión, la red «será» consciente.

Ahora bien, pensaremos, él «realmente» no puede creer eso. Sin embargo, debemos considerar esa incredulidad dentro de un contexto. ¿Cómo puede ser que 1400 gramos de cerebro, apropiadamente conectado a un suministro de sangre y una red de nervios, posea la experiencia consciente que nos es familiar? «Ese» es el enunciado que, sobre la base de todo lo que la ciencia ha revelado hasta el momento, desafía la credulidad. Pero nuestro propio mundo interior nos lleva a aceptarlo. Si nos presentan entonces alguna otra cosa que carezca de cuerpo y de cerebro y nos sugieren que también es consciente, el salto que tendremos que hacer para aceptar esa nueva afirmación puede parecer muy alto, pero en realidad es comparativamente modesto. Al aceptar la sugerencia casi ridícula de que un viscoso grumo de neuronas posee conciencia, ya hemos dado el gran salto. Esto no es un argumento a favor de lo que propone Tononi, pero pone de manifiesto que la familiaridad puede sesgar nuestro sentido de lo absurdo.

Si este enfoque resultase ser cierto, clarificaría qué cualidades debe poseer un sistema para producir una experiencia consciente. Eso sería un avance sustancial. Con todo, en su forma actual, la teoría de la información integrada nos dejaría con la pregunta de por qué la conciencia «se siente» como se siente. ¿De qué modo consigue la información altamente diferenciada y altamente integrada producir una conciencia interior? Para Tononi, simplemente lo hace. O, para ser más precisos, lo que sugiere es que tal vez esa no sea una buena pregunta. A su entender, nuestro propósito no es tanto explicar cómo surge la experiencia consciente de un torbellino de partículas como determinar las condiciones necesarias para que un sistema tenga esas experiencias. Y eso es lo que la teoría de la información integrada pretende hacer. Aunque valoro este punto de vista, mi intuición, moldeada por los espectaculares éxitos de las explicaciones reduccionistas, no se verá satisfecha hasta que enlacemos las sensaciones de la mente con procesos físicos en los que intervengan los ingredientes particulados conocidos.

Una última proposición que examinaremos a continuación persigue una estrategia distinta. Se trata de una explicación fisicalista de cabo a rabo, y proporciona uno de los enfoques más esclarecedores del misterio de la conciencia.

La mente moldea la mente

La teoría de la conciencia del neurocientífico Michael Graziano comienza con un par de cualidades bien conocidas del funcionamiento del cerebro que todos podemos aceptar con facilidad[29]. Para entenderlas, volvamos al Ferrari. Imaginemos que vemos el elegante exterior rojo del coche, notamos la suave forma ergonómica de las manillas de las puertas, olemos el inconfundible aroma de los coches nuevos y otras percepciones por el estilo. Intuitivamente, pensamos en estas percepciones como experiencias directas de una realidad externa, pero, como sabemos desde hace siglos, no es así. La ciencia moderna es explícita al respecto. La luz roja que se refleja en la superficie del Ferrari es un campo eléctrico que oscila más o menos cuatrocientos billones de veces por segundo en ángulo recto respecto a un campo magnético que oscila de manera parecida, y ambos viajan hacia nosotros a trescientos millones de metros por segundo. Esta es la física de la luz roja, así es el estímulo que reciben los ojos[30]. Nótese que no hay nada «rojo» en esta descripción física. El color se produce cuando el campo electromagnético penetra en los ojos, excita unas moléculas sensibles a la luz en la retina y genera un impulso que es llevado hasta la corteza visual del cerebro, que se especializa en el procesamiento de la información visual e interpreta la señal. El rojo es un constructo humano que se forma muy adentro en nuestro cerebro. ¿Y el olor a coche nuevo? Una historia parecida. Los asientos, la moqueta y los plásticos encierran moléculas de gas que inundan el interior del habitáculo. No existe ningún olor de coche nuevo hasta que esas moléculas entran por las ventanas de la nariz, rozan neuronas receptoras del epitelio olfatorio y generan un impulso que se transmite por el nervio olfativo hasta el bulbo olfatorio, que envía la señal procesada a varias estructuras neurológicas, donde se interpreta. Como con el rojo, el único lugar donde el automóvil huele a nuevo es en el interior de nuestro cerebro.

Así pues, cuando el Ferrari llama nuestra atención, se pone en marcha todo un conjunto de mecanismos cognitivos de procesamiento de datos. Rojo, aromático, brillante, metálico, vidrio, ruedas, motor, potencia, movimiento, velocidad, y tantas otras cosas, todo un abanico de cualidades físicas y capacidades funcionales que nuestro cerebro invoca y junta en la versión del deportivo que formamos en la mente. Hasta aquí, se parece a la teoría de la información integrada, pero la proposición de Graziano lleva todo esto en una dirección distinta. Su tesis central es que, por muy atentos que estemos a los

detalles, nuestras representaciones mentales siempre están enormemente simplificadas. Incluso la descripción del coche como «rojo» es un atajo para muchas frecuencias de luz parecidas pero distintas, las distintas tonalidades de este mismo color que se reflejan en distintas partes de la superficie de la carrocería: ondas electromagnéticas que oscilan, por ejemplo, a 435, 172, 847, 363, 122 ciclos por segundo desde un punto de la puerta del conductor, 447, 892, 629, 261, 106 ciclos por segundo desde un punto del capó, y así sucesivamente[31]. La cabeza nos daría vueltas si tuviera que afrontar tal sobreabundancia de detalles. «Rojo» es la útil, aunque esquemática simplificación. Y lo mismo se puede decir de la ingente colección de simplificaciones parecidas que de forma constante realiza la mente. Para todo lo que nos encontramos a nuestro alrededor, una representación esquemática no es solo adecuada, sino que además libera recursos mentales para otros propósitos importantes para sustentar la vida. Hace mucho tiempo, los cerebros que comenzaban a distraerse con las oleadas de detalles del mundo físico acababan siendo comidos. Los cerebros que sobrevivieron fueron los que evitaban quedar consumidos en los detalles sin valor para la supervivencia. Si reemplazamos el Ferrari rojo por una atronadora avalancha o un temblor de tierra, es fácil entender lo ventajoso que es para la supervivencia una representación mental imprecisa que facilite una respuesta rápida.

Cuando nuestra atención no se dirige a coches, avalanchas o terremotos, sino que se centra en animales o humanos, también creamos representaciones mentales esquemáticas parecidas. Intentamos evaluar qué ocurre dentro de sus cabezas, por ejemplo si un animal o humano determinado es amigo o enemigo, si supone seguridad o peligro, si busca una oportunidad mutua o una ganancia egoísta. Es evidente que evaluar al instante la naturaleza de nuestros encuentros con otros seres vivos posee un considerable valor para la supervivencia. A esta capacidad, perfeccionada durante muchas generaciones de selección natural, los investigadores la conocen como «teoría de la mente»[32] (teorizamos, intuitivamente, que los seres vivos están dotados de mentes que funcionan más o menos como la nuestra), o «actitud intencional»[33] (atribuimos conocimiento, creencias, deseos y, por tanto, intenciones a los animales y humanos con los que nos encontramos).

Graziano subraya que constantemente nos aplicamos esta misma capacidad a nosotros mismos, creando representaciones mentales de nuestro propio estado mental. Si miramos un Ferrari rojo, no solo reproducimos una representación esquemática del coche, sino también de nuestra atención

centrada en el deportivo. Todas las características que juntamos para representar el Ferrari se ven aumentadas por una cualidad adicional que resume nuestro propio foco mental: el Ferrari es rojo, suave y brillante, y nuestra atención está centrada en que el Ferrari es rojo, suave y brillante. Es así como monitorizamos la relación que entablamos con el mundo.

Como ocurre con la representación del Ferrari o con nuestra representación de la atención de otros, la representación de nuestra propia atención deja fuera muchísimos detalles. Ignora los disparos neuronales subyacentes, el procesamiento de la información y los complejos intercambios de señales que generan nuestro foco de atención para esbozar la propia atención, lo que en el lenguaje común llamamos «percatarse», o sea, ser conscientes. Y esto, según Graziano, es en esencia la razón de que la experiencia consciente parezca flotar libremente en la mente. Cuando el cerebro ejerce su afición por las representaciones esquemáticas simplificadas sobre sí mismo, sobre su propia atención, la descripción resultante hace caso omiso de los procesos físicos responsables de esa atención. Por eso los pensamientos y las sensaciones parecen etéreas, como si vinieran de la nada, como si se hallaran suspendidas en la cabeza. Si nuestra representación esquemática del propio cuerpo ignorase los brazos, los movimientos de las manos también parecerían etéreos. Y por eso la experiencia consciente nos parece radicalmente distinta, separada de los procesos físicos que acaecen en nuestros constituyentes particulados y celulares. El problema difícil parece difícil, la conciencia parece trascender a lo físico, pero solo porque nuestros modelos mentales esquemáticos nos impiden percatarnos de los mecanismos cerebrales que conectan nuestros pensamientos y sensaciones con los procesos físicos que los sustentan.

El atractivo de una teoría fisicalista como la de Graziano (y otras que se han propuesto y desarrollado)[34] es que la conciencia, como la vida, queda reducida a configuraciones de unos constituyentes inertes, sin pensamiento ni emoción, que la hacen posible. Ciertamente, entre nosotros y esa tierra prometida de un entendimiento reduccionista se extiende un inmenso paisaje neurológico, pero a diferencia de la *terra incognita* que nos ofrece Chalmers, que obligaría a los investigadores a hollar tierras foráneas y desbrozar malezas desconocidas, es probable que la expedición fisicalista nos reserve sorpresas menos exóticas. El reto no será tanto explorar un mundo extraño como cartografiar el propio, el cerebro, pero con un nivel de detalle sin precedente. Es la familiaridad del territorio lo que hará del viaje algo tan maravilloso. Sin necesidad de chispas supracientíficas, ni de apelar a nuevas

cualidades de la materia, la conciencia simplemente emergerá. La sustancia más ordinaria, regida por leyes ordinarias, realizando procesos ordinarios, poseerá la capacidad extraordinaria de pensar y sentir.

He conocido muchas personas que se resisten a esta perspectiva, que sienten que cualquier intento de subsumir la conciencia en la descripción física del mundo empequeñece nuestra más preciada cualidad, que sugieren que el programa fisicalista es el torpe intento de unos científicos cegados por el materialismo y desconocedores de los verdaderos prodigios de la experiencia consciente. Naturalmente, nadie sabe en qué acabará todo esto. Quizá de aquí a cien o mil años el programa fisicalista resulte ingenuo, aunque lo dudo. En cualquier caso, al aceptar esta posibilidad es importante también contestar la idea de que cuando definimos una base física de la conciencia, la devaluamos. Que la mente pueda hacer todo lo que hace es extraordinario. Que la mente pueda hacer todo ello sin otra cosa que los mismos ingredientes y fuerzas que mantienen la integridad de una taza de café, eso más extraordinario si cabe. La conciencia quedaría despojada de misterio, pero de ningún modo disminuida.

Conciencia y física cuántica

Década tras década se ha sugerido que la física cuántica es esencial para entender la conciencia. En cierto sentido, no cabe duda de que es así. Las estructuras materiales, y el cerebro lo es, están hechas de partículas cuyo comportamiento está regido por las leyes de la mecánica cuántica. Esta teoría apuntala, por consiguiente, la base física de todo, incluida la mente. Pero cuando se encuentran la conciencia y el cuanto, no es raro que alguno sugiera conexiones más profundas. Muchas de estas tienen su origen en una laguna de nuestro conocimiento de la mecánica cuántica que ha resistido un siglo de reflexión de algunas de las más destacadas mentes filosóficas. Me explico.

La mecánica cuántica es el marco teórico más preciso que poseemos para describir procesos físicos. Ninguna de sus predicciones se ha visto contradicha por experimentos replicables, y los resultados de algunos de sus cálculos más minuciosos concuerdan con los datos experimentales en más de una parte en mil millones. Si el lector no está avezado a las medidas

cuantitativas, puede pasarlas por alto casi todo el tiempo. Pero esta vez no. Pensemos en el número que acabo de citar:

> Los cálculos de la mecánica cuántica basados en la ecuación de Schrödinger concuerdan con mediciones experimentales con una precisión superior a nueve dígitos a la derecha del punto decimal[35].

Los trompetas deberían sonar y la especie hacer una reverencia ante tan grandioso triunfo del conocimiento humano.

Pero el corazón de la mecánica cuántica alberga un enigma.

La principal característica nueva de la mecánica cuántica es que sus predicciones son probabilísticas. La teoría puede decir que hay una probabilidad del 20 % de que un electrón se encuentre aquí, del 35 % de que se encuentre allá y del 45 % de que se encuentra más allá. Si entonces medimos la posición del electrón en un gran número de versiones idénticas del mismo experimento, encontramos con una exactitud extraordinaria que en el 20 % de las mediciones el electrón «está aquí», en el 35 % «está allá» y en el 45 % «está más allá». Por eso confiamos en la teoría cuántica.

Que la teoría cuántica dependa de probabilidades no debería parecer especialmente raro. Al fin y al cabo, cuando tiramos una moneda utilizamos probabilidades para describir el resultado posible: hay una probabilidad del 50 % de que salga cara y del 50 % de que salga cruz. Pero hay una diferencia, familiar para muchos, pero no por ello menos sorprendente: en la descripción clásica ordinaria, después de lanzar la moneda pero antes de mirarla, la moneda está cara arriba o cara abajo, aunque no sepamos cuál de las dos posibilidades es cierta. En cambio, en la descripción cuántica, antes de examinar por dónde anda un electrón que tiene una probabilidad del 50 % de estar aquí y del 50 % de estar allí, la partícula no se encuentra «ni aquí ni allí». Lo que la mecánica cuántica nos dice es que la partícula se encuentra suspendida en un estado borroso que es una mezcla de estar «tanto aquí como allí». Y si las probabilidades le dan al electrón una probabilidad distinta de cero de encontrarse en varios lugares, entonces, de acuerdo con la mecánica cuántica, se encontrará suspendida en un estado borroso, simultáneamente en todos esos lugares. Eso sí es tan extraño y alejado de nuestra experiencia que nos sentimos tentados a descartar la teoría sin pensarlo dos veces. Y de no ser por la inigualable capacidad de la mecánica cuántica para explicar los datos experimentales, esa reacción sería común y justificada. Pero los datos nos obligan a tratar la mecánica cuántica con el mayor de los respetos, de manera

que los científicos hemos trabajado sin descanso para dar sentido a esta característica tan contraria a nuestra intuición[36].

El problema es que cuanto más trabajamos, mayor es la extrañeza. No hay nada en las ecuaciones cuánticas que muestre cómo pasa la realidad de la mezcla borrosa de muchas posibilidades al estado único y bien definido que observamos en el momento de hacer una medición. De hecho, si suponemos (como parece sensato) que esas mismas y certeras ecuaciones cuánticas no se aplican únicamente a los electrones (y otras partículas) que estamos estudiando, sino también a los electrones (y otras partículas) que constituyen nuestros equipos de medición, y las que constituyen nuestro propio cuerpo y nuestro propio cerebro, entonces, de acuerdo con las matemáticas, la transición no debería producirse en absoluto. Si un electrón está en suspensión aquí y allí, nuestro equipo debería detectarla aquí y allí, y, tras leer la pantalla del medidor, nuestro cerebro debería pensar que el electrón se encuentra tanto aquí como allí. Dicho de otro modo, tras realizar una medición, la borrosidad cuántica de las partículas que estamos estudiando debería infectar nuestro equipo, nuestro cerebro y, presumiblemente, nuestra conciencia, de modo que nuestros pensamientos quedasen suspendidos en una mezcla borrosa de múltiples posibilidades. Pero no es eso lo que ocurre cuando realizamos una medición, sino que presenciamos un resultado único y bien definido. El reto que se plantea, conocido como «problema cuántico de la medición», consiste en resolver la enigmática disparidad entre la realidad cuántica borrosa que describen las ecuaciones y la realidad nítida y familiar que, de manera constante, experimentamos[37].

Ya en la década de 1930, los físicos Fritz London y Edmond Bauer[38], y algunas décadas más tarde el premio Nobel Eugene Wigner[39], sugirieron que la clave podría estar en la conciencia. Al fin y al cabo, el enigma solo es tal en el momento en que informamos de nuestra experiencia consciente de una realidad definida, que es lo que produce la discordancia entre lo que decimos y lo que predicen las ecuaciones de la mecánica cuántica. Imaginemos, pues, que las reglas de la mecánica cuántica se aplican a lo largo de toda la cadena, desde el electrón que estamos midiendo a las partículas del aparato que realiza la medición y las de la pantalla de visualización del aparato. Pero cuando miramos la pantalla y los datos sensoriales fluyen hasta nuestro cerebro algo cambia: las leyes cuánticas estándar dejan de aplicarse. En cuanto entra en juego la conciencia, pasa a primer plano algún otro proceso, uno que garantiza que tengamos conocimiento de un único resultado definido. La conciencia sería entonces un participante íntimo de la física cuántica que

dictaría que, a medida que el mundo cambia, se eliminen todos los futuros posibles menos uno, de la propia realidad o, por lo menos, de nuestra experiencia consciente.

Es innegable que eso resulta atractivo. La mecánica cuántica es misteriosa. La conciencia es misteriosa. Es entretenido imaginar que los dos misterios están relacionados, o que son el mismo misterio, o que cada uno de los misterios resuelve el otro. Pero en todas mis décadas de inmersión en la mecánica cuántica nunca he encontrado argumentos matemáticos o datos experimentales que me hayan movido a modificar la valoración que siempre he hecho de este supuesto vínculo: extremadamente improbable. Nuestros experimentos y observaciones apoyan la idea de que cuando se examina un sistema cuántico (tanto si lo estudia un ser vivo como si el examinador no posee mente), el sistema se escapa de su niebla cuántica probabilística y asume una realidad definida. Las interacciones, no la conciencia, son las que fuerzan la emergencia de una realidad definida. Por supuesto, para verificar esto (o, de hecho, cualquier otra cosa) me veo obligado a hacer intervenir mi conciencia: no tengo manera de percatarme de un resultado sin que mi mente consciente participe en el proceso. Así que no hay ningún argumento irrefutable de que la conciencia no desempeñe algún papel cuántico especial. Aun así, incluso en las aproximaciones más refinadas, que han ido mucho más allá de una identificación superficial de dos misterios aparentemente distintos, las conexiones de conciencia cuántica que se proponen son tenues.

A medida que profundicemos en nuestra comprensión de la mecánica cuántica, ahondaremos también en la comprensión de los procesos microfísicos que subyacen a las funciones de todo, incluido el cuerpo y el cerebro. Desde una actitud fisicalista, la conciencia se encuentra entre esas funciones, y por lo tanto algún día la incluiremos en el marco explicativo cuántico. No obstante, salvo que se produzca alguna gran sorpresa, los libros de texto de mecánica cuántica del futuro cercano o lejano no incluirán directivas especiales sobre cómo usar las ecuaciones en torno a la conciencia. Por magnífica que sea, la conciencia será entendida como una cualidad física más que surge de un universo cuántico.

Libre albedrío

No hay mucha gente que se enorgullezca de que su páncreas produzca quimotripsina o de que la red del nervio trigémino facilite el estornudo. No sentimos un interés personal por nuestros procesos involuntarios. Si se me pregunta quién soy, me dirijo a los pensamientos, sensaciones y recuerdos a los que puedo acceder con el ojo de la mente o interrogar con mi voz interior. Todos tenemos un páncreas que produce quimotripsina y todos estornudamos, pero quiero pensar que hay algo profunda, total e intrínsecamente mío en lo que pienso, lo que siento y lo que hago. Enlazada de manera estrecha a esta intuición hay una creencia tan común que muchos de nosotros nunca le prestamos la menor atención: tenemos una voluntad libre. Somos autónomos. Nosotros decidimos. Somos la fuente última de nuestras acciones. ¿O acaso no?

Esta pregunta ha inspirado más páginas de la literatura filosófica que ninguna otra. Hace dos mil años, la austera visión del mundo de Demócrito, consistente en átomos y el vacío, fue un amago presciente de la unidad de la naturaleza que despachaba los caprichos de los dioses a favor de leyes inmutables. Pero tanto si nuestras idas y venidas están plenamente controladas por un poder divino o por la ley física, nos quedamos con la pregunta de dónde queda lugar, si es que queda, para las acciones libres de la voluntad[40]. Un siglo más tarde, Epicuro, que había rechazado la intervención divina, se lamentaba de que el determinismo científico sofocaba el libre albedrío. Si aceptamos que los dioses tienen autoridad, por lo menos nos queda la oportunidad de que nuestra firme reverencia se vea recompensada con un módico libre albedrío. Pero la ley natural, inmune a toda adulación, no puede aflojar las riendas. Para resolver el dilema, Epicuro imaginó que cada cierto tiempo los átomos ejecutaban de manera espontánea un giro aleatorio, que desafiaban su sino y daban paso a un mundo que no estaba determinado por el pasado. Aunque creativo, pocos hallaron en la inserción arbitraria del azar en las leyes de la naturaleza un origen convincente de la libertad humana. Así que, durante los siglos que siguieron, el problema del libre albedrío no dejó de arrugar la frente de todo un panteón de venerables pensadores: san Agustín, Tomás de Aquino, Thomas Hobbes, Gottfried Leibniz, David Hume, Immanuel Kant, John Locke, y todo un linaje demasiado largo para nombrarlo en el que se incluyen muchos de los que actualmente piensan sobre estas cuestiones en departamentos de filosofía de todo el mundo.

He aquí una versión moderna del argumento que destrona el libre albedrío. Nuestras experiencias parecen confirmar que influimos en cómo se desarrolla la realidad a través de acciones que reflejan pensamientos, deseos y

decisiones que tomamos con voluntad libre. Sin embargo, si mantenemos nuestra actitud fisicalista, todos nosotros no somos más que constelaciones de partículas[41] cuyo comportamiento está plenamente gobernado por la ley física. Nuestras elecciones son el resultado del movimiento de nuestras propias partículas a este u otro lado de nuestro cerebro. Nuestras acciones son el resultado de que nuestras partículas se muevan de un modo u otro en nuestro cuerpo. Y todos los movimientos de partículas, ya sea en el cerebro, el cuerpo o una pelota de béisbol, están controlados por la física y, por consiguiente, totalmente dictados por decreto matemático. Las ecuaciones determinan el estado de nuestras partículas hoy en función del estado en que se hallaban ayer, sin que ninguno de nosotros tenga la menor oportunidad de eludir las matemáticas y moldear o cambiar libremente el desarrollo que dicta la ley. De hecho, si seguimos esta cadena hacia el pasado, el Big Bang es la fuente última de todas las partículas, y su comportamiento a lo largo de la historia cósmica ha sido dictado por las insensatas e innegociables leyes de la física, que determinan la estructura y función de todo lo que existe. Nuestro sentido de la individualidad, el valor y la estima descansan en nuestra autonomía. Frente a la intransigencia de la ley física, la autonomía se repliega. No somos más que juguetes que las reglas desapasionadas del cosmos mueven de un lado para otro.

La pregunta central, pues, es si hay alguna manera de eludir esta aparente disolución del libre albedrío en el movimiento de partículas serviles. Muchos pensadores lo han intentado. Algunos han renegado del reduccionismo. Aunque una ingente cantidad de datos confirman que poseemos un conocimiento profundo de las leyes que gobiernan las partículas individuales (electrones, quarks, neutrinos y demás), quizá cuando cien mil billones de billones de partículas se agrupan en un cuerpo y un cerebro humanos, ya no están gobernadas por las leyes fundamentales del micromundo, a por lo menos no del todo. Y, siguiendo la argumentación, quizá eso permita fenómenos a escalas macroscópicas que las leyes microscópicas prohibirían, en particular el libre albedrío.

La verdad es que a nadie se le ha ocurrido realizar los análisis matemáticos necesarios para hacer predicciones sobre el comportamiento de las partículas que constituyen una persona de acuerdo con las leyes físicas. La complejidad de las matemáticas excede en mucho nuestras capacidades de computación. Se nos escapa incluso la predicción del movimiento de un objeto mucho más simple, como una bola de billar, porque pequeñas imprecisiones en la determinación de su dirección y velocidad inicial pueden

amplificarse exponencialmente a medida que rebota en las bandas de la mesa. Así que no me voy a centrar en la predicción del siguiente movimiento de ninguna persona, sino en la existencia de leyes que gobiernan ese siguiente movimiento. Y aunque los cálculos excedan nuestra capacidad actual, nunca hemos encontrado el menor indicio matemático, experimental u observacional de que esas leyes no ejerzan un control total. Está claro que del movimiento coordinado de un ingente número de ingredientes microscópicos pueden surgir fenómenos inesperados e impresionantes, de los tifones a los tigres, pero toda la evidencia sugiere que si lográsemos resolver los cálculos matemáticos para grupos tan grandes de partículas interactivas, lograríamos predecir su comportamiento colectivo. Así pues, aunque sea lógicamente concebible que algún día descubramos que las colecciones de partículas que constituyen los cuerpos y los cerebros escapan a las normas que rigen las colecciones inanimadas, esta posibilidad contraviene todo lo que la ciencia ha revelado hasta el día de hoy sobre cómo funciona el mundo.

Otros investigadores han apostado por la mecánica cuántica. A fin de cuentas, la física clásica es determinista: si alimentamos las matemáticas de la física clásica (las ecuaciones de Newton) con las posiciones y velocidades exactas de todas las partículas en un momento dado, las ecuaciones nos dirán sus posiciones y velocidades en cualquier momento futuro. Con tal rigidez, con el futuro plenamente determinado por el pasado, ¿cómo puede quedar lugar para el libre albedrío? El estado de nuestras partículas en este mismo momento, mientras leemos estas palabras y reflexionamos sobre estas ideas, está determinado por su configuración mucho antes de que naciéramos y, por consiguiente, no puede ser producto de nuestra voluntad. Pero en la física cuántica, como hemos visto, las ecuaciones solamente predicen la «probabilidad» de que las cosas sean de un modo u otro en algún momento del futuro. Al inserir un elemento de probabilidad, de azar, la mecánica cuántica parece proveer una versión moderna y motivada por experimentos del giro epicúreo, aflojando las riendas deterministas. Pero el lenguaje laxo puede resultar engañoso. La matemática de la mecánica cuántica, la ecuación de Schrödinger, es tan determinista como la matemática de la física clásica newtoniana. La diferencia es que allí donde Newton toma como entrada el estado del mundo en este momento y produce un único estado del mundo en un momento futuro, la mecánica cuántica toma como entrada el estado del mundo en este momento y produce una tabla única de probabilidades para el estado del mundo en un momento futuro. Las ecuaciones cuánticas ofrecen muchos futuros posibles, pero tallan en piedra matemática, de manera

determinista, la probabilidad de cada uno de ellos. Como Newton, Schrödinger no deja lugar al libre albedrío.

Otros investigadores han dirigido su atención al problema todavía no resuelto de la medición cuántica. Es comprensible. Una brecha en el conocimiento científico es un lugar atractivo donde esconder algo muy apreciado, al menos hasta que se cierre. Como se recordará, todavía no hay consenso sobre cómo realiza el mundo las transiciones desde los enunciados probabilísticos de la mecánica cuántica hasta la realidad definida de la experiencia cotidiana. ¿Cómo se selecciona un futuro único entre la lista de posibilidades que ofrece la mecánica cuántica? Y de manera particular para lo que aquí estamos tratando, ¿estará escondida en la respuesta el libre albedrío? Lamentablemente, no. Consideremos un electrón que según la mecánica cuántica tenga una probabilidad del 50 % de estar «aquí» y un 50 % de estar «allí». ¿Podemos escoger libremente el resultado, «aquí» o «allí», que revelará una observación de su posición? No. Los datos atestiguan que el resultado es aleatorio, y los resultados aleatorios no son elecciones libres. Los datos confirman también que los resultados acumulados en tantos y tantos experimentos muestran una regularidad estadística: en este ejemplo, la mitad de los resultados encuentran el electrón «aquí» y la mitad lo encuentran «allí». La elección de una voluntad libre no puede estar restringida, ni siquiera en un sentido estadístico, por reglas matemáticas. Sin embargo, tal como la evidencia demuestra en este caso, y también en otros, las matemáticas sí rigen. Y aunque la transición de las probabilidades cuánticas a las certezas experimentales siga siendo enigmática, lo que está claro es que el libre albedrío no forma parte del proceso.

Ser libres exige que no seamos marionetas cuyos hilos mueve la ley física. Que esta sea determinista (como en la física clásica) o probabilística (como en la física cuántica) es de gran significación para la evolución de la realidad y para los tipos de predicciones que puede hacer la ciencia. Pero para evaluar el libre albedrío, esa distinción es irrelevante. Si las leyes fundamentales hacen su trabajo de forma continua, sin pararse ni un momento a la espera de una decisión humana, aplicándose del mismo modo incluso cuando las partículas conforman un cuerpo o un cerebro, entonces no hay lugar para el libre albedrío. De hecho, tal como confirma cada observación o experimento científico realizado, mucho antes de que los humanos entráramos en escena las leyes regían sin interrupción; tras nuestra llegada, siguieron rigiendo sin interrupción.

En resumen, somos entes físicos formados por grandes colecciones de partículas gobernadas por las leyes de la naturaleza. Todo lo que hacemos, todo lo que pensamos, se reduce a los movimientos de esas partículas. Si me estrechan la mano, las partículas que constituyen la mano del otro empujan arriba y abajo contra las que constituyen la mía. Si alguien me dice ¡hola!, las partículas que componen sus cuerdas vocales mueven partículas de aire en su garganta que disparan una reacción en cadena de partículas en colisión que se desplazan como una onda por el aire hasta golpear contra otras que conforman mis tímpanos, donde se pone en movimiento otro conjunto de partículas dentro de mi cabeza, y así llego a oír lo que me dicen. Las partículas de mi cerebro responden a los estímulos, producen un pensamiento («tiene una fuerte encajada»), y envían señales que otras partículas llevan hasta las que conforman mi brazo y hacen que mi mano se mueva arriba y abajo con la de quien me saluda. Y como todas las observaciones, experimentos y teorías válidas confirman que el movimiento de las partículas está totalmente controlado por reglas matemáticas, no podemos interceder en este implacable proceso más de lo que podemos interceder en el valor de pi.

Nuestras elecciones «parecen» libres porque no somos testigos de la acción de las leyes físicas en su forma más fundamental, porque nuestros sentidos no revelan la actuación de las leyes de la naturaleza en el mundo de las partículas. Estos últimos y nuestro raciocinio se centran en acciones y escalas humanas cotidianas: pensamos en el futuro, comparamos procederes, ponderamos posibilidades. En consecuencia, cuando nuestras partículas actúan, nos parece que su comportamiento colectivo surge de nuestras elecciones autónomas. Sin embargo, si tuviésemos la visión sobrehumana a la que apelamos antes y pudiésemos analizar la realidad cotidiana al nivel de sus constituyentes fundamentales, reconoceríamos que nuestros pensamientos y comportamientos no son más que complejos procesos de partículas en movimiento que producen una poderosa sensación de voluntad libre, pero en realidad están totalmente gobernados por la ley física.

Y aun así, concluir nuestra discusión aquí sería pasar por alto una variación del tema de la libertad que no solo concuerda con nuestro conocimiento de la ley física, sino que capta una cualidad tan esencial que podemos tenerla por una característica definitoria de lo que significa ser humano.

Rocas, humanos y libertad

Imaginemos que una persona, quizá el propio lector, y una roca, cada uno enfrascado en sus cosas, están sentadas una junto a la otra en un banco de un parque. Cuando paso junto a ellas, la persona ve que de un árbol cercano se ha partido una rama pesada que cae directamente hacia mí. Salta del banco y me empuja con fuerza para que ambos escapemos sin daño. ¿Qué explicación tiene ese acto heroico de salvar una vida? Todas las partículas que forman parte de esa persona y de esa roca están sujetas a las mismas leyes, así que ni la una ni la otra gozan de libre albedrío. Pero solo la persona salta del banco; la roca se queda quieta. ¿Cómo explicamos eso?

Me salva la persona y no la piedra porque sus partículas están ordenadas de una manera tan espectacular, configuradas de una forma tan asombrosa, que pueden realizar movimientos exquisitamente coreografiados que no son posibles para la roca[42]. Cuando paso junto al banco, la persona me puede saludar con la mano o con la voz, o decirme que ha resuelto las ecuaciones de la teoría de cuerdas, o saltar a la comba, o salvarme del golpe de una rama o millones de posibilidades más. Los fotones que rebotan en mi cara y entran en sus ojos, las ondas de sonido que vibran desde una rama al partirse y que entran en sus oídos, las influencias táctiles de una brisa fuerte que sopla contra su piel y muchos otros y variados estímulos externos e internos, ponen en marcha cascadas de partículas por todo su cuerpo que llevan señales que provocan toda suerte de sensaciones, pensamientos y comportamientos que, a su vez, desencadenan nuevos torrentes de partículas. Por suerte para mí, la cascada en respuesta a los estímulos de la rama partida lleva a las partículas de la persona del banco a actuar de inmediato. En comparación, las respuestas de la roca a los estímulos nos parecen más apagadas. Los fotones, las ondas de sonido y las presiones táctiles provocan las reacciones más simples. Las partículas de la roca quizá se agiten con levedad, quizá aumenten de manera ligera su temperatura, o quizá, si el viento es lo bastante fuerte, se desplacen como un todo las posiciones del conjunto que forman. Eso es lo máximo que puede suceder. No es mucho lo que ocurre dentro de la roca. Lo que nos hace especiales es que nuestra sofisticada organización interna permite un amplio abanico de respuestas y comportamientos.

La lección de todo ello es que, cuando se trata de evaluar el libre albedrío, se puede ganar mucho si desplazamos la atención de un estrecho foco sobre

las causas últimas a una observación más amplia de la respuesta humana. Nuestra libertad no es respecto a unas leyes físicas que no podemos afectar. Nuestra libertad consiste en exhibir comportamientos (saltar, pensar, imaginar, observar, deliberar, explicar, etc.) que no tienen a su disposición otros conjuntos de partículas. La libertad humana no está relacionada con la elección libre. Todo lo que la ciencia ha revelado hasta el momento no ha hecho sino reforzar la idea de que esa intercesión volitiva en el desarrollo de la realidad no existe. La libertad humana tiene que ver más bien con verse liberados de las ataduras de ese estrecho abanico de respuestas que desde siempre ha restringido el comportamiento del mundo inanimado.

Esta idea de libertad no requiere libre albedrío. El acto de salvar una vida que acabamos de narrar, aunque hondamente apreciado, surge de la acción de las leyes físicas y, en este sentido, no es resultado de una elección libre. Pero el hecho de que las partículas de aquella persona pudiesen saltar del banco y yo pudiera después reflexionar sobre su acto y sentirme emocionado por esa reflexión es verdaderamente asombroso. Las partículas agrupadas en una roca no pueden hacer nada parecido, ni de lejos, a todo esto. Son estas capacidades, que se manifiestan en los prodigios del pensamiento, el sentimiento y la acción, las que captan la esencia de la libertad humana.

Mi uso del término «libre» para describir comportamientos que de acuerdo con las leyes de la física no constituyen un ejercicio de libre voluntad puede parecer una artimaña lingüística. Pero la cuestión, como la escuela de filosofía compatibilista viene sugiriendo desde hace mucho tiempo, es que, en lo que concierne a la libertad y la física, no todo está perdido, sino que se deriva un gran beneficio de considerar formas alternativas de libertad que se avienen con la ley física. Hay varias propuestas sobre cómo conseguirlo, pero es como si esas teorías nos dieran con pesadumbre la mala noticia: «En lo que atañe a la forma tradicional de voluntad libre, no somos diferentes de una roca», para luego, justo cuando nos retiramos para lamentarnos, exclamar: «Pero ¡alegraos! Hay esta «otra forma» de libertad, gratificante a su manera, que tenemos en abundancia»[43]. En lo que yo defiendo, esa libertad se encuentra en vernos liberados de un abanico restringido de comportamientos.

Personalmente, me reconforta enormemente esta forma de libertad. Mientras me siento aquí, escribiendo mis reflexiones, me deja frío el saber que al nivel de las partículas fundamentales todo lo que pienso y hago no pasa de ser el despliegue de unas leyes físicas que quedan fuera de mi control. Lo que importa es que, a diferencia de mi escritorio, de mi silla o de mi tazón, mi colección de partículas puede ejecutar un conjunto enormemente diverso de

comportamientos. De hecho, mis partículas acaban de componer esta frase y me alegro de que lo hayan hecho. Ya sé que también esa reacción no es más que la respuesta de mi ejército de partículas a las órdenes marciales de la mecánica cuántica, pero eso no merma en nada la realidad del sentimiento. No soy libre porque pueda subvertir la ley física, sino porque mi prodigiosa organización interna ha emancipado mis respuestas comportamentales.

Relevancia, aprendizaje e individualidad

Puede parecer que renunciar al concepto tradicional de libre albedrío todavía nos obliga a abandonar una gran parte de lo que más apreciamos. Si el despliegue de la realidad, incluidos los seres sintientes, queda establecido por la ley física, ¿qué importa lo que hagamos? ¿No podemos sentarnos cómodamente sin hacer nada y dejar que la física siga su curso? ¿Dónde queda la individualidad? ¿Qué papel desempeñan entonces capacidades que valoramos tanto, como el aprendizaje y la creatividad?

Veamos primero esta última pregunta. Para ello, resultará útil pensar en un robot aspirador. ¿Posee este la cualidad tradicional del libre albedrío? No hay ni que pensarlo. No es una pregunta con trampa. Casi todos estaremos de acuerdo en que no. Sin embargo, mientras el aspirador se desliza sobre el suelo de la sala de estar y topa con paredes, columnas y muebles, su configuración particulada interna se reorganiza (se actualizan sus mapas de navegación y sus instrucciones internas) y esos cambios modifican el comportamiento inmediato del aspirador. El robot «aprende». Es más, a medida que se enfrenta al desafío de navegar alrededor de los objetos que encuentra, las soluciones que emplea (evitar aquellas escaleras, describir un círculo alrededor de esa pata de la mesa y demás) manifiestan una rudimentaria creatividad[44]. El aprendizaje y la creatividad no requieren de libre albedrío.

Nuestra organización interna, nuestro «programa», es más refinado que el de un robot aspirador, y eso nos brinda una capacidad mucho más sofisticada de aprender y crear. Nuestras experiencias, sean encuentros externos o deliberaciones internas, nos reconfiguran. Y esas reconfiguraciones afectan al comportamiento posterior de nuestras partículas. Es decir, actualizan nuestro programa, ajustan las instrucciones que guían los pensamientos y acciones

subsiguientes. Una chispa de imaginación, un error garrafal, una frase ingeniosa, un abrazo empático, un comentario desdeñoso, un acto heroico, todo ello es resultado del progreso de nuestra personal constelación de partículas de una configuración a otra. Al observar cómo cada persona o cosa responde a nuestras acciones, nuestra constelación de partículas cambia de nuevo y reconfigura su patrón para ajustar aún más nuestro comportamiento. En lo referente a nuestros ingredientes particulares, eso «es» aprendizaje. Y cuando los comportamientos resultantes son novedosos, la reconfiguración ha generado creatividad.

Esta discusión subraya uno de nuestros temas centrales: la necesidad de relatos encajados que expliquen capas de la realidad diferentes, pero interconectadas. Si nos contentásemos con un relato que describiera el despliegue de la realidad únicamente al nivel de las partículas, no nos veríamos motivados a introducir conceptos como aprendizaje o creatividad (o, ya puestos, entropía o evolución). Nos bastaría con saber cómo unas colecciones de partículas reorganizan continuamente su configuración, y esa información nos la ofrecen las leyes fundamentales (junto a una especificación del estado de las partículas en algún momento del pasado). Pero la mayoría de nosotros no nos contentamos con ese tipo de historia. Nos parece esclarecedor narrar también otros relatos, compatibles con el reduccionista, pero enfocados a escalas mayores y más familiares. Es en estos relatos, cuyos protagonistas principales son agregados de partículas como nosotros y el robot aspirador, donde conceptos como aprendizaje y creatividad (y entropía y evolución) proporcionan un lenguaje indispensable. Allí donde el relato reduccionista para describir el robot aspirador catalogaría el movimiento de trillones de partículas, el relato de nivel superior explicaría que el aspirador usó sus sensores para reconocer que se hallaba al borde de unas escaleras, almacenó en su memoria esa posición peligrosa e invirtió su curso para evitar una caída potencialmente catastrófica. Ambos relatos son compatibles por completo, aunque uno utilice el lenguaje de partículas y leyes, y el otro, el de estímulos y respuestas. Y como las reacciones del robot aspirador incluyen la capacidad de modificar el comportamiento futuro mediante la actualización de sus instrucciones internas, los conceptos de aprendizaje y creatividad son esenciales para el relato de nivel más alto.

Esos relatos encajados son todavía más relevantes cuando se trata de nosotros mismos. El relato reduccionista proporciona conocimiento importante pero limitado. Reconocemos, por ejemplo, que estamos hechos de la misma sustancia y gobernados por las mismas leyes que todas las

estructuras materiales. Pero es en el relato de nivel superior, en el relato humano, donde vivimos nuestras vidas. Pensamos y deliberamos, luchamos y nos esforzamos, triunfamos o fracasamos. Las historias explicadas en este lenguaje más familiar deben ser, también en este caso, del todo compatibles con la explicación reduccionista relatada en términos de partículas. Pero cuando se aplican a la vida cotidiana, estas historias de nivel superior son incomparablemente más esclarecedoras. Cuando ceno con mi esposa, no me interesa conocer el movimiento de sus cien mil millones de trillones de partículas. En cambio, me interesa mucho lo que piensa, los lugares que visita, la gente que conoce.

Dentro de esos relatos de nivel superior, hablamos como si nuestras acciones tuviesen relevancia, como si nuestras elecciones tuviesen efecto, y nuestras decisiones, significado. En un mundo que progresa gobernado por la resoluta ley física, ¿es realmente así? Sí, desde luego que sí. Cuando mi propio yo de diez años encendió una cerilla dentro de un horno lleno de gas, esa acción tuvo consecuencias. Desató una explosión. El relato de nivel superior que nos presenta una serie de eventos enlazados (sentirse hambriento, poner pizza en el horno, abrir el gas, esperar, encender la cerilla, quedar envuelto en llamas) es preciso y esclarecedor. La física no niega esta historia, no le resta relevancia, sino que la aumenta, nos dice que hay otro relato, por debajo de la historia al nivel humano, que se expresa con el lenguaje de las leyes y las partículas.

Lo notable, y para algunos perturbador, es que esos relatos subyacentes revelen que una creencia común que impregna todas nuestras historias de nivel superior es incorrecta. Nos sentimos autores últimos de nuestras elecciones, decisiones y acciones, pero el relato reduccionista deja bien claro que no es así. Ni nuestros pensamientos ni nuestros comportamientos pueden escapar al control de la ley física. Pese a ello, las secuencias causalmente entrelazadas que están en el corazón de nuestros relatos de nivel superior (la sensación de hambre que me hizo meter la pizza en el horno, comprobar la temperatura y encender una cerilla) son manifiestas y reales. Los pensamientos, las respuestas y las acciones importan. Tienen consecuencias. Son vínculos en la cadena del despliegue físico. Lo inesperado a partir de nuestras experiencias e intuiciones es que esos pensamientos, respuestas y acciones surjan de causas antecedentes encauzadas por las leyes de la física.

La responsabilidad también desempeña un papel. Aunque mis partículas y, por consiguiente, mis comportamientos, se encuentren bajo la plena jurisdicción de la ley física, «yo» soy, de una forma muy literal aunque poco

familiar, responsable de mis acciones. En todo momento, «soy» mi colección de partículas; «yo» no es más que una expresión abreviada de mi especial configuración de partículas (que, aunque dinámica, mantiene patrones lo bastante estables como para proporcionar un sentido coherente de identidad personal[45]). En consecuencia, el comportamiento de mis partículas es «mi» comportamiento. Que bajo este se encuentre la física por medio del control que ejerce sobre mis partículas es sin duda interesante. Que ese comportamiento no sea fruto de un libre albedrío merece ser reconocido. Pero estas observaciones no menguan en nada la descripción de nivel superior que reconoce que mi especial configuración de partículas (el modo en que estas se disponen en una intrincada red química y biológica que implica genes, proteínas, células, neuronas, conexiones sinápticas y demás) responde de un modo que es único de mi persona. Cada uno de nosotros habla de un modo distinto, actúa de forma diversa, responde a su gusto y piensa a su estilo porque nuestras partículas están dispuestas de diferente manera. Al tiempo que mi configuración de partículas aprende y piensa, sintetiza, interactúa y responde, deja huella en mi individualidad e imprime responsabilidad a cada una de las acciones que realizo[46].

La capacidad humana para responder de forma tan variada es testimonio de los principios centrales que han guiado nuestra exploración hasta este momento: el paso a dos de la entropía y la evolución por medio de la selección natural. El paso a dos entrópico explica cómo se pueden formar agregados ordenados en un mundo que cada vez está más desordenado, y cómo algunos de esos agregados, las estrellas, pueden mantenerse estables durante miles de millones de años mientras producen una flujo constante de luz y calor. La evolución explica de qué modo, en un medio favorable como lo es un planeta bañado por el calor constante de una estrella, hay conjuntos de partículas que pueden reunirse en configuraciones que permiten comportamientos complejos, desde la replicación y la reparación hasta la extracción de energía y los procesos metabólicos, la locomoción o el crecimiento. Los conjuntos que adquieren las capacidades adicionales de pensar y aprender, de comunicar y cooperar, de imaginar y predecir, están mejor equipados para sobrevivir y, por consiguiente, para producir conjuntos semejantes con capacidades parecidas. Así pues, la evolución selecciona estas capacidades y, generación tras generación, las va refinando. Con el tiempo, algunas colecciones llegan a la conclusión de que sus poderes cognitivos son tan notables que trascienden las leyes físicas. Algunas de las más reflexivas de estas colecciones se sienten entonces perplejas ante el conflicto entre el

libre albedrío que experimentan y el implacable control que ejercen las leyes físicas que reconocen. Pero el hecho es que no hay conflicto porque no se puede trascender las leyes físicas. No es posible. Así que las colecciones de partículas tienen que volver a evaluar sus poderes para centrarse ahora, no en las leyes que gobiernan las propias partículas, sino en los comportamientos de nivel superior, absolutamente complejos, extraordinariamente variados, que cada colección de partículas, cada individuo, puede manifestar y experimentar. Con esa reorientación, los conjuntos de partículas pueden contar relatos esclarecedores de asombrosos comportamientos y experiencias, impregnados de voluntades que se sienten libres y hablan como si gozasen de control autónomo, pese a estar por completo controlados por las leyes de la física.

Algunos se resistirán a esta conclusión. Yo desde luego lo hice. Aunque esté convencido de la argumentación que he presentado, eso no basta para deshacer la fuerte y profunda impresión de que controlo libremente lo que ocurre dentro de mi cabeza. Pero la fuerza de esa impresión se debe en buena parte a su familiaridad. Y como muchas de las personas que han experimentado con sustancias psicoactivas pueden atestiguar, cuando se modifica un poco la identidad de las partículas que recorren el cerebro, lo familiar puede alterarse. El equilibrio de poderes dentro del cerebro puede cambiar. La mente parece tener su propia mente. Hace décadas, en la bella ciudad de Ámsterdam, una experiencia así se convirtió en una de las noches más aterradoras de mi vida. Mi mente creó un mundo interno en el que había inacabables copias de mí, cada una de ellas empeñada en socavar la realidad experimentada por las otras. En cuando uno de mis yos era convencido de que experimentaba la «verdadera» realidad, el siguiente revelaba el artificio de ese mundo, borrando de él a todos y a todo lo que mi yo inicial apreciaba para revelar una nueva realidad «verdadera», que mi nuevo yo podía habitar con confianza, solo para que la angustiante secuencia se repitiera una vez más. Y otra.

Desde la perspectiva de la física, tan solo había introducido en mi cerebro una pequeña colección de partículas foráneas. Pero ese cambio bastó para eliminar mi familiar impresión de que controlo libremente lo que ocurre en mi mente. Mientras que la pauta desde la perspectiva reduccionista se mantuvo con plena vigencia (partículas gobernadas por ley física), el patrón desde el punto de vista humano (una mente fiable dotada de libre albedrío que se orienta y mueve por una realidad estable) se vino abajo. Naturalmente, no presento este momento de alteración de la mente como argumento a favor o

en contra del libre albedrío. Pero aquella experiencia me hizo comprender de manera visceral algo que de otro modo habría quedado como una abstracción. Nuestro sentido de quiénes somos, de las capacidades que poseemos y del libre albedrío que aparentemente ejercemos, todo es producto de las partículas que se mueven por nuestras cabezas. Si jugueteamos con ellas, esas cualidades familiares pueden desmoronarse. Aquella experiencia me ayudó a conjugar mi comprensión racional de la física y mi sentido intuitivo de la mente.

La experiencia y el lenguaje cotidianos están llenos de referencias implícitas y explícitas al libre albedrío. Hablamos de elegir y de tomar decisiones, de las implicaciones de esas acciones para nuestras vidas y para las vidas de nuestro prójimo. Debo insistir en que nuestra discusión sobre el libre albedrío no implica que esas descripciones carezcan de sentido o deban ser eliminadas. Estas están narradas en el lenguaje apropiado para el relato del nivel humano. Nosotros «elegimos». «Tomamos» decisiones. «Iniciamos» acciones. Y esas acciones tienen implicaciones. Todo eso es real. Pero como el relato humano tiene que ser compatible con la explicación reduccionista, tenemos que refinar nuestro lenguaje y nuestras suposiciones. Necesitamos dejar a un lado la idea de que nuestras elecciones y decisiones y acciones tienen su origen último en nosotros mismos, que surgen de nuestras voluntades independientes, que emergen de deliberaciones que caen fuera del alcance de la ley física. Debemos reconocer que aunque la «sensación» de libre albedrío es real, no lo es en cambio la capacidad de ejercer la voluntad libremente, la capacidad de la mente humana para trascender las leyes que controlan la progresión física. Si reinterpretamos «libre albedrío» como esa sola sensación, nuestros relatos en el ámbito humano se tornan compatibles con la explicación reduccionista. Y junto con el cambio de énfasis del origen último al comportamiento liberado, podemos aceptar una variedad de libertad humana que es inexpugnable y de enorme alcance.

Como ocurre con el origen de la vida, no existe un momento nítidamente definido en el que surge la conciencia, emerge la reflexión sobre uno mismo o se asienta la sensación de libre albedrío. Pero el registro arqueológico sugiere que hace unos cien mil años, o tal vez antes, nuestros antepasados ya habían comenzados a tener esas experiencias. Entonces ya podíamos mirar a nuestro alrededor y hacernos preguntas.

¿Qué hicimos, entonces, con esos poderes?

6

LENGUAJE Y NARRACIÓN

De la mente a la imaginación

Las pautas ocupan un lugar central en la experiencia humana. Sobrevivimos porque podemos sentir y responder a los ritmos del mundo. Mañana será distinto de hoy, pero bajo toda esa infinidad de idas y venidas, confiamos en cualidades que perduran. El sol volverá a salir, las rocas seguirán cayendo, el agua fluyendo. Estos y una ingente colección de pautas afines que observamos a cada momento influyen profundamente en nuestro comportamiento. Los instintos son esenciales y la memoria importa porque las pautas persisten.

La matemática es la articulación de pautas. Con la ayuda de un puñado de símbolos podemos captar una pauta con economía y precisión. Galileo lo resumió al declarar que el libro de la naturaleza, que él creía tan revelado por Dios como la Biblia, estaba escrito en el lenguaje de las matemáticas. Durante los siglos que siguieron, los pensadores han debatido una versión secular de ese punto de vista. ¿Es la matemática un lenguaje que los humanos han desarrollado para describir las pautas que observamos? ¿O es la fuente de la realidad, y las pautas que observamos son la expresión de una verdad matemática? Mis sensibilidades románticas me inclinan a lo segundo. Qué maravilloso es imaginar que nuestras manipulaciones matemáticas acceden a los cimientos mismos de la realidad. Pero mi apreciación menos sentimental deja lugar a que las matemáticas sean un lenguaje de nuestra propia factura, desarrollado en parte por un exceso de indulgencia hacia las pautas. A fin de cuentas, la mayor parte de los análisis matemáticos desempeñan un pobre papel a la hora de promover la supervivencia. Rara debía ser la comida, y más

rara aún la oportunidad de reproducirse, que nuestros antepasados consiguiesen contemplando números primos o cuadrando el círculo.

En la era moderna, las capacidades de Einstein establecieron un estándar incomparable para acceder a los ritmos de la naturaleza. Pese a ello, aunque su legado se puede resumir en un puñado de expresiones matemáticas tersas, precisas y de gran alcance, las incursiones de Einstein en los más recónditos recovecos de la naturaleza no siempre comenzaron con ecuaciones. Ni siquiera con el lenguaje. «A menudo pienso en música»[1] —tal es como él mismo lo describía—. Muy raramente pienso en palabras»[2]. Otros sienten lo mismo. No es mi caso. En ocasiones, cuando me he enfrentado a un problema difícil, he tenido un destello de comprensión que debía reflejar algún proceso cerebral por debajo de mi conciencia. Pero cuando soy consciente, aunque use imágenes mentales para encontrar el camino hacia una solución, sería excesivo decir que las palabras están ausentes o esbozar una asociación con la música. Lo más habitual es que haga progresos en la física manipulando ecuaciones y recogiendo las conclusiones en frases normales y corrientes que escribo a mano en libretas que una tras otras van llenando estanterías. Cuando me concentro, a menudo hablo conmigo mismo, por lo general en silencio, a veces de forma audible. Las palabras son esenciales en el proceso. Aunque me parece que la sentencia de Wittgenstein, «Los límites de mi lenguaje significan los límites de mi mundo»[3], intenta abarcar demasiado (no me cabe duda de que hay cualidades vitales del pensamiento y la experiencia que caen fuera del ámbito del lenguaje, una cuestión sobre la que volveremos más adelante), sin lenguaje mi capacidad para ciertos tipos de maniobras mentales se vería mermada. Las palabras no expresan solamente el razonamiento, también lo vitalizan. O como dice con incomparable elegancia Toni Morrison: «Todos morimos. Tal vez sea ese el significado de la vida. Pero hacemos lenguaje. Tal vez sea esa la medida de nuestras vidas»[4].

Salvo por algún genio singular, aunque quizá también en ese caso, el lenguaje es esencial para liberar la imaginación. Con él podemos articular una visión en la que el mundo real no nos proporciona más que un pobre atisbo de posibilidades mucho más ricas. Podemos sugerir imágenes, auténticas o de fantasía, en mentes remotas o cercanas. Podemos transmitir un conocimiento conseguido con esfuerzo, cambiando la dificultad de descubrir por la facilidad de enseñar. Podemos compartir planes y acordar intenciones, permitiendo la acción coordinada. Podemos combinar nuestras capacidades creativas individuales en una fuerza comunitaria de enorme relevancia. Podemos examinar nuestro interior y reconocer que, aunque modelados por la

evolución, somos capaces de elevarnos por encima de las necesidades de la supervivencia. Y podemos maravillarnos de cómo una colección cuidadosamente ordenada de sonidos guturales y fricativos, de semivocales y pausas, puede transmitir ideas sobre la naturaleza del espacio y el tiempo o proporcionarnos una emotiva semblanza de la vida y la muerte: «Wilbur nunca olvidó a Carlota. Aunque quiso mucho a sus hijos y nietos, ninguna de las nuevas arañas llenó nunca el lugar que ocupaba en su corazón».

Con el lenguaje, nos embarcamos en la escritura de una narración colectiva, una superposición de la historia que dé sentido a la experiencia.

Las primeras palabras

Pese al palíndromo apócrifo «Madam, I'm Adam» («Señora, soy Adán»), nadie sabe cuándo empezamos a hablar ni por qué. Darwin conjeturó que el lenguaje surgió del canto e imaginó que los individuos dotados de talentos como el de Elvis debían atraer más fácilmente a sus parejas y que, por consiguiente, en generaciones posteriores aumentaría el número de cantantes con talento. Con el tiempo suficiente, sus melodiosos sonidos se habrían ido transformando en palabras[5]. Alfred Russel Wallace, el menos celebrado codescubridor, con Darwin, de la evolución por medio de la selección natural, lo veía de otro modo. Estaba convencido de que la selección natural no podía arrojar luz sobre las capacidades humanas para la música, el arte y, en particular, el lenguaje. En el competitivo ruedo de la supervivencia, nuestros antepasados cantantes, pintores y habladores no eran, para Wallace, mejores que sus primos menos atractivos. Wallace solo podía ver una salida: «Debemos, pues, admitir la posibilidad —escribió en *The Quarterly Review*, una revista con muchos lectores— de que durante el desarrollo de la raza humana una Inteligencia Superior haya guiado las mismas leyes hacia más nobles fines»[6]. Las leyes de la evolución, por lo demás ciegas, deben haber sido aprovechadas por un poder divino para dirigir el desarrollo de la comunicación y la cultura. Cuando Darwin leyó el artículo de Wallace quedó horrorizado, respondió con un enfático «no»[7] en el margen, y le hizo saber a Wallace: «Confío en que no haya matado sin remedio a su hijo y el mío»[8].

Durante el siglo y medio que ha transcurrido desde entonces, los investigadores han propuesto diversas teorías sobre el origen y desarrollo

inicial del lenguaje, pero como en la lucha libre por parejas (*tag team*), a cada propuesta que parecía convincente le ha salido un nuevo rival. Hay mucho más consenso sobre los primeros momentos del universo. Pero por raro que parezca, eso tiene sentido. El nacimiento del universo dejó un gran rastro de fósiles. El del lenguaje no. Las radiación de fondo de microondas que todo lo impregna, las abundancias concretas de átomos simples, como el hidrógeno y el helio, y el movimiento de las galaxias lejanas son huellas directas de los procesos que se dieron durante la infancia del universo. Las ondas de sonido, que son las primeras manifestaciones del lenguaje, se las lleva el viento. Apenas un momento después de producidas, se desvanecen. A falta de restos tangibles, los investigadores tienen mucho margen para reconstruir la historia temprana del lenguaje, y el resultado, como es de esperar, es una profusión de teorías distintas, y a menudo conflictivas.

No obstante, hay un amplio consenso en cuanto a que el lenguaje humano es profundamente distinto de cualquier otra forma de comunicación en el reino animal. Si nos pusiéramos en la piel de un mono vervet normal y corriente, podríamos emitir un grito de alarma para avisar al resto de la tribu de que el depredador que se acerca es un leopardo (un aullido breve y agudo), un águila (un bufido grave repetido) o una pitón (un sonido que, por onomatopeya, se denomina «chutters»[9]). Pero nos sentiríamos perdidos para expresar el terror que sentimos cuando ayer se deslizó aquella serpiente, o para comunicar un plan para depredar mañana el nido cercano de un ave. Nuestras habilidades para el lenguaje se reducirían a un colección pequeña y cerrada de vocalizaciones específicas con significados fijos, todos centrados en lo que ocurre aquí y ahora. Lo mismo puede decirse de la comunicación que manifiestan otras especies. Bertrand Russell lo resumió así: «Un perro no puede contar su autobiografía; por muy elocuentes que sean sus ladridos, no puede explicar que sus padres eran pobres, pero honestos»[10]. El lenguaje humano es completamente distinto porque es abierto. En lugar de usar frases fijas y limitadas, combinamos y recombinamos una colección finita de fonemas para producir secuencias complejas, jerárquicas y casi inacabables de sonidos que sirven para transmitir un abanico virtualmente ilimitado de ideas. Con la misma facilidad con la que podemos hablar de la serpiente de ayer o del nido de mañana, podemos describir un sueño fabuloso de unicornios voladores o el desasosiego en que nos sume la noche cuando abraza el horizonte.

Pero si ahondamos un poco más, enseguida nos encontramos con las controversias. ¿Cómo es posible que a los pocos años de nacer, y sin

instrucción formal, hablemos con fluidez una o incluso varias lenguas? ¿Estamos dotados de un cerebro especialmente configurado para adquirir el lenguaje, o basta como explicación la inmersión cultural unida a nuestra propensión general a aprender? ¿Comenzó el lenguaje humano como colecciones de vocalizaciones con significados fijos, como las llamadas de alarma del mono vervet, que luego se dividieron en palabras, o, al contrario, el lenguaje partió de sonidos elementales que luego crecieron hasta formar palabras y frases? ¿Por qué tenemos siquiera lenguaje? ¿Seleccionó la evolución directamente el lenguaje porque proporciona una ventaja para la supervivencia, o es el lenguaje un producto secundario a la evolución de otros rasgos, como un cerebro de mayor tamaño? Y durante todos aquellos miles de años, ¿de qué diablos hablábamos? ¿Y por qué?

Para Noam Chomsky, uno de los lingüistas más influyentes de nuestros tiempos, la capacidad humana para adquirir el lenguaje se debe a que todos llevamos grabada una gramática universal, un concepto con un rico linaje histórico que se remonta al filósofo del siglo XIII Roger Bacon, quien llegó a la conclusión de que muchas de las lenguas del mundo comparten unos fundamentos estructurales. En su uso moderno, el término ha visto varias interpretaciones, y con el paso de los años el propio Chomsky ha ido refinando su significado. En su última y discutida forma, la gramática universal propone que hay algo en nuestra constitución neurobiológica innata que nos predispone al lenguaje, una suerte de impulso en toda la especie que nos empuja a escuchar, entender y hablar. ¿De qué otro modo, prosigue el razonamiento, los niños, sometidos al azaroso, fragmentario y desenfrenado asalto lingüístico de cada día, podrían internalizar un gran número de reglas y constructos gramaticales precisos si no es con un formidable arsenal mental predispuesto para procesar tal arremetida verbal? Y como cualquier niño puede aprender cualquier lengua, el arsenal mental no puede ser específico de una de ellas, sino que la mente debe poder aferrarse a un núcleo común y universal a todas las lenguas. Chomsky ha propuesto que un singular evento neurobiológico, una «leve reconfiguración de los circuitos de la mente» que debió producirse hace unos ochenta mil años, debió permitir que nuestros ancestros adquirieran esta capacidad, desencadenando así un Big Bang cognitivo que repercutió en toda la especie[11].

Los psicólogos cognitivos Steven Pinker y Paul Bloom, pioneros de una aproximación darwinista al lenguaje, sugieren una historia no tan hecha a medida en la que el lenguaje surgió y se desarrolló por el proceso habitual de cambios paulatinos, cada uno de los cuales debía conferir cierta ventaja para

la supervivencia[12]. Cuando nuestros antepasados cazadores-recolectores merodeaban por las llanuras y los bosques, la capacidad de comunicarse («grupo de jabalíes hozando enfrente y un poco a la izquierda», o «esta es una manera mejor de atar una piedra afilada al mango») era fundamental para el funcionamiento eficaz del grupo y esencial para compartir el conocimiento acumulado. Los cerebros capaces de comunicarse con otros cerebros contaban de este modo con una ventaja en la competitiva arena de la supervivencia y la reproducción, y eso habría favorecido que las capacidades lingüísticas se perfeccionasen y difundiesen. Otros investigadores identifican una serie de adaptaciones, entre ellas el control de la respiración, la memorización, el pensamiento simbólico, la conciencia de otras mentes, la formación de grupos y otras, que conjuntamente habrían conducido a la emergencia del lenguaje, aunque este hubiese tenido poco que ver con el valor para la supervivencia de las propias adaptaciones[13].

Tampoco sabemos con ninguna certeza cuánto tiempo llevamos hablando. Los indicios lingüísticos del pasado remoto son virtualmente inexistentes, pero el estudio de sucedáneos arqueológicos plausibles ha llevado a los investigadores a sugerir horquillas de tiempo para la aparición del lenguaje. Artefactos como las herramientas fabricadas (piedras talladas o huesos bien atados a un mango), arte rupestre, grabados geométricos y collares de cuentas proporcionan indicios de que hace al menos cien mil años que nuestros antepasados ya ocupaban la mente en la planificación, el pensamiento simbólico y las interacciones sociales avanzadas. Como tendemos a vincular estas sofisticadas capacidades cognitivas con el lenguaje, podemos imaginar que mientras nuestros antepasados afilaban sus lanzas y hachas o se arrastraban por oscuras cavernas para pintar aves y bisontes, charlaban sobre la caza del día siguiente o la hoguera de la noche anterior.

Hay otros indicios arqueológicos más directos de la capacidad de hablar. Los científicos que estudian el crecimiento de las cavidades craneales y los cambios estructurales en la boca y la garganta concluyen que si nuestros antepasados lo hubieran querido, hace más de un millón de años ya disponían de la capacidad fisiológica para conversar. También la biología molecular nos da algunas pistas. En los humanos el habla requiere de un alto grado de destreza vocal y oral, y en 2001 unos investigadores identificaron lo que podría ser una base genética esencial para esas habilidades. Mientras estudiaban una familia británica con un trastorno del habla que se extendía a tres generaciones, con dificultad para la gramática y para coordinar movimientos complejos de boca, rostro y garganta que son necesarios para el

habla normal, los investigadores se fijaron en un error genético, un cambio en una sola letra de un gen llamado FOXP2 que se encuentra en el cromosoma 7 de los humanos[14]. Este error tipográfico en las instrucciones lo comparten los miembros afectados de la familia, por lo cual se le considera fuertemente implicado en la disrupción tanto del lenguaje como del habla. Las primeras informaciones en la prensa apodaron a FOXP2 el «gen de la gramática» o «el gen del lenguaje», unos titulares que irritaron a los investigadores informados; sin embargo, dejando de lado la hipérbole, el gen FOXP2 parece ser un componente esencial del lenguaje y el habla normales.

Lo curioso es que se han identificado variantes cercanas del gen FOXP2 en muchas especies, desde los chimpancés hasta varias aves y peces, lo cual permite a los investigadores seguir los cambios que se han producido en el gen a lo largo de la historia evolutiva. En el caso de los chimpancés, la proteína codificada por el gen FOXP2 difiere de la nuestra en tan solo dos aminoácidos (de más de setecientos), mientras que la de los neandertales era idéntica a la nuestra[15]. ¿Hablaban entonces nuestros primos neandertales? Nadie lo sabe. Pero esta línea de indagación nos lleva a pensar que tal vez se estableciese una base genética para el habla y el lenguaje en algún momento posterior a nuestra separación de los chimpancés, hace unos cuantos millones de años, pero anterior a nuestra separación de los neandertales, hace unos seiscientos mil años[16].

Los vínculos propuestos entre el lenguaje y cada uno de estos marcadores históricos (artefactos antiguos, estructuras fisiológicas, perfiles genéticos) son ingeniosos pero tentativos. En consecuencia, los estudios basados en estos marcadores sugieren una horquilla muy ancha para el estreno de las primeras palabras del mundo, desde hace decenas de miles de años a hace unos pocos millones de años. Como los lectores escépticos habrán observado, una cosa es poseer la capacidad física y la agilidad mental para entablar una conversación, y otra que realmente se entable.

Entonces ¿qué puede habernos motivado a hablar?

Por qué empezamos a hablar

No faltan ideas acerca de por qué nuestros antepasados rompieron el silencio. El lingüista Guy Deutscher llama la atención sobre el hecho de que los

investigadores han sugerido que las primeras palabras surgieron «de gritos y llamadas, de gestos con las manos y lenguaje de signos, de la destreza para imitar, de la habilidad para engañar, del acicalamiento, del canto, baile y ritmo, de mascar, chupar y lamer, y de casi cualquier otra actividad que se pueda imaginar»[17], una deliciosa lista que probablemente refleje más una teorización creativa que los antecedentes históricos del lenguaje. Con todo, una o quizá alguna combinación de estas sugerencias podría ofrecernos un relato relevante, así que veamos algunas de las propuestas sobre cómo se originaron las primeras palabras y por qué tuvieron éxito.

En los viejos tiempos, antes de la innovación que supuso llevar al niño en un portabebés de tela a la espalda, una madre ocupada en una tarea que requiriera el uso de las dos manos no tenía más remedio que acostar a su bebé. Los que gritaban y balbuceaban llamaban la atención de la madre, y posiblemente la respuesta de la madre fuese también una vocalización (un arrullo, un susurro, un rumor) ayudado por expresiones faciales, gestos con la mano y caricias tranquilizadoras. El balbuceo del bebé y los amorosos cuidados de la madre habrían promovido unas tasas de supervivencia infantil más altas, seleccionando de este modo la vocalización y, según esta propuesta, situando a nuestros antepasados en la trayectoria de las palabras y el lenguaje[18].

O, para quien no quede convencido con esto de la jerga maternal, los gestos proporcionan un medio directo de comunicar información básica pero vital, como cuando señalamos un objeto con la cabeza o un lugar con el dedo. Algunos de nuestros parientes primates no humanos, que carecen de lenguaje hablado, se las arreglan bastante bien para comunicar ideas rudimentarias con la ayuda de gestos que hacen con las manos o el cuerpo. Y en condiciones controladas de investigación, los chimpancés han aprendido cientos de signos con las manos que designan diversas acciones, objetos e ideas. Así pues, es posible que nuestro lenguaje hablado surgiese de una fase previa de comunicación mediante gestos. A medida que fuimos ocupando cada vez más las manos en la fabricación y uso de herramientas y que las reuniones sociales, cada vez más complejas, hacían que la gesticulación resultase ineficaz o torpe (por la dificultad de ver por la noche, o de ver las manos y el cuerpo de todos en grupos de caza o recolección de alimentos), la vocalización podría habernos ofrecido un medio más eficaz de compartir información. Como yo soy de los que mueven las manos en cuanto comienzan a hablar, y a veces incluso antes, esta explicación me parece especialmente plausible.

Si la jerga de los gestos tampoco convence, se puede tomar en consideración la propuesta del psicólogo evolutivo Robin Dunbar de que el lenguaje surgió como un sustituto eficiente de la extendida actividad del acicalamiento social[19]. Si fuésemos chimpancés, haríamos amigos y sellaríamos alianzas extrayendo cuidadosamente liendres, descamaciones y cualquier otro detrito de la piel de otros miembros de nuestro grupo. Algunos nos devolverían el favor, y los de mayor estatus social tomarían nota del servicio, aunque dejarían nuestras liendres tranquilas. El ritual de acicalamiento es una actividad organizativa que promueve y mantiene las jerarquías, las camarillas y las coaliciones. Los primeros humanos debían realizar un acicalamiento social parecido, pero a medida que los grupos fueron creciendo, estas relaciones de servicio individual habrían requerido una excesiva inversión de tiempo. Las amistades, las parejas y las alianzas son vitales, pero también lo es asegurarse de que haya alimento suficiente. ¿Qué hacer, entonces? En opinión de Dunbar, este dilema podría haber desencadenado el origen del lenguaje. En algún momento, nuestros antepasados debieron sustituir el acicalamiento manual por el intercambio verbal, lo cual les habría permitido compartir información con rapidez (quién hace qué a quién, quién ha engañado, quién anda metido en qué maquinaciones subversivas), y los habría librado de la carga de sacar las liendres, beneficiándose a cambio de unos minutos de chismorreo. Estudios recientes han demostrado que dedicamos hasta un 60 % de nuestras conversaciones a chismorrear, una cifra impactante, sobre todo para quienes nunca hemos conseguido dominar el arte del comadreo, y que algunos investigadores sostienen que refleja el principal propósito del lenguaje en su origen[20].

El lingüista Daniel Dor lleva aún más lejos el papel social del lenguaje. En un persuasivo estudio de muy amplio espectro propone que es una herramienta construida de manera comunitaria con una función específica y profundamente importante: ofrecer a los individuos el poder de guiar la imaginación de otros[21]. Antes del lenguaje, los intercambios sociales estaban dominados por experiencias compartidas. Si veíamos, oíamos o comíamos lo mismo, podíamos referirnos a ello mediante gestos, sonidos o dibujos. Pero habría sido difícil comunicar experiencias no compartidas, por no mencionar el abrumador desafío que supone expresar pensamientos abstractos o emociones interiores. El lenguaje nos habría permitido superar esos retos. Con el lenguaje, el mercado para nuestros intercambios sociales creció enormemente: podíamos usarlo para describir experiencias que otros quizá

nunca habían vivido porque, gracias a la palabra, podíamos hacer que aparecieran en sus mentes. Con el paso de los milenios, a medida que el bienestar de nuestro antepasados prelingüísticos se tornaba cada vez más dependiente de acciones coordinadas en grupo (cooperación para cazar presas de gran tamaño, cuidados e instrucción compartida de los jóvenes[22]), traspasamos los límites del intercambio no verbal, trajimos el lenguaje al mundo y establecimos un marco social muchísimo más grande que ya no englobaba solo las experiencias compartidas, sino también los pensamientos compartidos.

Estas y prácticamente el resto de las propuestas sobre el origen del lenguaje ponen el énfasis en la palabra hablada, la manifestación exterior del lenguaje. Con característica ironía, Noam Chomsky da un giro de ciento ochenta grados y propone que, en su más temprana encarnación, el lenguaje podría haber facilitado el pensamiento interior[23]. El procesamiento, la planificación, la predicción, la evaluación, el razonamiento y la comprensión son algunas de las tareas esenciales que la voz interior que hablaba entre los oídos de nuestros antepasados podría haber realizado con plena confianza en cuanto el pensamiento pudo hacer uso del lenguaje. Desde este punto de vista, el lenguaje verbal se habría desarrollado posteriormente, como ocurrió con la adición de altavoces a los primeros ordenadores personales. Es como si, mucho antes de hablar, nuestros antepasados ya estuviesen sumidos en pensamientos profundos y silentes, deliberando incansablemente sobre sus tareas diarias, pero guardándose sus reflexiones. Sin embargo, la posición de Chomsky es polémica. Los investigadores han señalado características intrínsecas del lenguaje que parecen diseñadas para mapear conceptos internos sobre la palabra hablada (en particular, la fonología y buena parte de la estructura gramatical), lo que sugiere que desde un buen principio el lenguaje ha servido para la comunicación exterior.

Aunque su origen sigue siendo un enigma, lo que es incuestionable, y de enorme relevancia para nuestro viaje, es que el lenguaje constituye una potente herramienta en combinación con el pensamiento. Tanto si una versión interna del lenguaje precedió a su vocalización externa como si no, y tanto si esa vocalización tuvo como acicate el canto, el cuidado de los bebés, la gesticulación, el chismorreo, el discurso comunitario, la posesión de un cerebro más grande o cualquier otra cosa, una vez que la mente humana se hizo con el habla, la relación entre nuestra especie y la realidad se situó a las puertas de un cambio radical.

Ese cambio llegaría con uno de los comportamientos más extendidos e influyentes de los humanos: contar historias.

Narración e intuición

George Smith tenía prisa. Los dedos de su mano derecha tocaban de forma ligera pero persistente el margen de ébano incrustado en la larga mesa de caoba. Acababa de saber que Robert Ready, el maestro restaurador de piedra del museo, tardaría varios días en volver. Varios días. ¿Cómo iba a esperar? Durante tres años se había echado la gabardina a los hombros, había cogido su primorosamente elaborado bocadillo de mermelada y queso Stilton y había esquivado muchedumbres y carros mientras corría hasta el Museo Británico, donde pasaba los minutos que restaban de su almuerzo examinando endurecidos fragmentos de tablillas de barro halladas durante una excavación arqueológica en Nínive. Su familia era pobre. Había dejado la escuela con catorce años para formarse como aprendiz de grabador de billetes de banco. Su futuro parecía limitado. Pero George era un genio. Había aprendido por su propia cuenta la antigua lengua asiria, convirtiéndose en un experto de la escritura cuneiforme. Los conservadores del museo, a quienes había caído en gracia aquel extraño muchacho que pasaba por allí cada mediodía, se dieron cuenta enseguida de que era más ducho que cualquiera de ellos en el descifrado de los grabados cuneiformes, así que lo incorporaron a su grupo como empleado a tiempo completo. Ahora, unos pocos años más tarde, George había seleccionado miles de fragmentos de barro y ensamblado con ellos la primera tablilla completa, de la que ya había descifrado una buena parte. De este modo descubrió, o al menos así lo creía, un magnífico secreto narrado por la serie de trozos y cantos triangulares, una referencia al mito del diluvio anterior al relato de Noé en el Antiguo Testamento, pero necesitaba que Robert Ready limpiase suavemente la capa de costra que oscurecía una sección esencial del texto. George podía oler el triunfo. Temblaba solo con imaginar el descubrimiento que lo elevaría a una nueva vida. No podía esperar. Así que decidió limpiar él mismo la tablilla.

Es verdad, me estoy dejando llevar. En realidad, George Smith sí que esperó. Días más tarde, Robert Ready regresó, se puso manos a la obra, y se nos reveló así la más antigua narración de nuestra especie de la que tenemos

registro, *El poema de Gilgamesh*, compuesto en Mesopotamia en el tercer milenio antes de Cristo. Mi relato libre es fiel a lo que los narradores, los humanos, hemos hecho siempre: reconstruir la realidad (lo que sabemos sobre el George Smith histórico[24]), a veces con moderación (como en este caso), otras veces con mayor intensidad, en unas ocasiones buscando un giro dramático, en otras con vistas a la posteridad, y aún en otras por el simple placer de contar un buen cuento. La motivación artística de quienes escribieron Gilgamesh, una narración a la que posiblemente dieran forma muchas voces durante muchas generaciones, nos es desconocida. Pero en este relato lleno de sueños y batallas, celos y arrogancia, corrupción e inocencia, los personajes y sus preocupaciones nos hablan con claridad a través de los milenios.

Y eso es lo verdaderamente sorprendente. Durante los cinco mil años que posiblemente hayan transcurrido desde que se creó el *Gilgamesh*, la historia ha sido testigo de innumerables transformaciones en nuestro modo de comer y refugiarnos, de vivir y comunicarnos, de medicarnos y de procrear, pero aun con todo eso, nos reconocemos de inmediato en la narración. Gilgamesh y su hermano de armas Enkidu parten a una aventura que pondrá a prueba su coraje, su moral y, en último término, su sentido de quiénes son: unas *Thelma y Louise* del Neolítico. Hacia el final de su epopeya, mientras Gilgamesh se cierne sobre el cuerpo sin vida de Enkidu, se lamenta en unos términos desgarradores que nos resultan muy familiares:

> Cubrió entonces el rostro de su amigo como el de una novia, como un águila revoloteaba en torno a él, como una leona cuyas crías le han sido arrebatadas, sus pasos una y otra vez andaba y desandaba, se arrancaba sus rizados cabellos y los arrojaba, se quitaba con violencia sus espléndidas galas y las tiraba [como] si fuesen un tabú[25].

Como tantos otros, yo he estado ahí. Hace décadas, cuando en mi pobre y minúsculo apartamento iba de una estancia a otra dando tumbos, intentaba escapar frenéticamente de la noticia de la repentina muerte de mi padre. Incluso con una distancia de cientos, sino miles de generaciones, es mucho lo que todavía compartimos con nuestros antepasados.

Y no es solo que todos los humanos nos aflijamos y lloremos, nos emocionemos y gocemos, exploremos y nos maravillemos. También compartimos el ansia por expresar todo eso, por procesarlo todo a través de la narración. *Gilgamesh* quizá sea el relato escrito más antiguo que se ha

preservado, pero si nuestra especie ya escribía historias hace cinco mil años, es seguro que mucho tiempo antes ya nos las contábamos. Es lo que hacemos. Y llevamos mucho tiempo haciéndolo. La pregunta es por qué. ¿Por qué habríamos de renunciar a cazar un bisonte o un jabalí más, o a recoger más raíces y frutos, solo para pasar tiempo imaginando aventuras con dioses petulantes y viajes a mundos fantásticos?

El lector me responderá: porque nos gustan las historias. Desde luego. ¿Por qué si no habríamos de ir al cine esta noche aunque mañana tengamos que entregar tal o cual informe? ¿Por qué si no habríamos de sentir un placer culpable cuando dejamos de lado el «trabajo de verdad» para seguir leyendo esa novela o viendo esa serie? Sí, ahí está el principio de una explicación, pero hay más. ¿Por qué comemos helado? ¿Porque nos gusta? Claro que sí. Pero, tal como han defendido convincentemente los psicólogos evolutivos, el análisis puede ir todavía más al fondo de la cuestión[26].

Aquellos de nuestros antepasados que disfrutaban zampando alimentos ricos en energía, como las frutas carnosas o las nueces maduras, resistían mejor los años de vacas flacas, y por lo tanto producían más descendencia y propagaban la predilección genética por los dulces y las grasas. El fuerte deseo que hoy sentimos por un helado de pistacho de Häagen-Dazs, que ya no se ensalza como algo que promueva la salud, es una reliquia moderna de la vital búsqueda de calorías de tiempos pretéritos. Es evolución darwiniana que se manifiesta en nuestras propensiones. No es que los genes determinen el comportamiento. Nuestras acciones son el resultado de una compleja amalgama de influencias biológicas, históricas, sociales, culturales y de todo tipo que quedan impresas en la configuración de partículas que somos. Pero nuestros gustos e instintos son una parte esencial de esa mezcla y, al servicio siempre de una mayor probabilidad de sobrevivir, la evolución tuvo mucho que ver con su desarrollo. Podemos aprender nuevos trucos, pero genéticamente y, por tanto, en términos instintivos, somos perros viejos.

La cuestión es, pues, si la evolución darwiniana puede iluminar no solo nuestros gustos culinarios, sino también los literarios. ¿Por qué nuestros ancestros se sintieron atraídos a dedicar unos preciosos recursos de tiempo, energía y atención a contar historias que, a primera vista, no parecen mejorar nuestras perspectivas de supervivencia? Las historias de ficción resultan especialmente enigmáticas. ¿Qué utilidad evolutiva podía obtenerse de seguir las aventuras de personajes imaginarios que se enfrentan a desafíos inventados en mundos inexistentes? Con su imparable paseo aleatorio por el paisaje adaptativo, la evolución es eficaz a la hora de eludir predisposiciones

extravagantes del comportamiento. Cabe pensar, pues, que una mutación genética que nos alejase del instinto de contar historias, que liberase tiempo para afilar unas cuantas lanzas más o para aprovechar los restos de algún otro cadáver de búfalo, habría de ofrecernos una ventaja en términos de supervivencia que, con el paso del tiempo, acabaría asentándose. Pero no fue así. O, por alguna razón, es una oportunidad que la evolución ha dejado pasar.

Los investigadores han intentado entender por qué, pero las pistas son escasas. Hay muy pocos indicios que permitan establecer la prevalencia o la utilidad de la narración en nuestros antepasados de hace miles de generaciones. Esto subraya un reto general que afecta a toda la investigación que busca una base evolutiva para el comportamiento, un reto que encontraremos en varias formas en los capítulos que siguen. Desde el punto de vista de la selección natural, lo que importa es el impacto de este o aquel comportamiento sobre las probabilidades de sobrevivir y reproducirse de nuestros antepasados durante la mayor parte de su historia. Una explicación fiable requiere, por consiguiente, un conocimiento detallado del estado mental de los antiguos cuando se enfrentaban a su medio ancestral. Pero el registro histórico solo proporciona información sobre el último cuarto del 1 % de los aproximadamente dos millones de años que nos remontan a las primeras migraciones humanas fuera de África. Los investigadores han desarrollado sondas indirectas del pasado, entre ellas el examen detallado de artefactos antiguos, las extrapolaciones de análisis etnográficos de los grupos de cazadores-recolectores que aún perviven en nuestros días, y estudios de la arquitectura del cerebro, todo ello en busca de ecos cognitivos de los desafíos adaptativos del pasado. El mosaico de indicios restringe la teorización, pero todavía deja espacio holgado para variadas perspectivas.

Una de esas hipótesis sostiene que buscar un papel adaptativo para la narración de historias es buscar un aumento de la eficacia biológica en el lugar equivocado. Una determinada predisposición comportamental puede no ser más que un simple subproducto de otros procesos evolutivos que sí mejoran la supervivencia y que, por consiguiente, evolucionaron del modo habitual por medio de la selección natural. La directiva general, vivamente enfatizada en un famoso artículo de Stephen Jay Gould y Richard Lewontin, es que no podemos escoger a gusto una explicación evolutiva[27]. A veces la evolución ofrece paquetes indivisibles. Los cerebros grandes, como el humano, con mucha materia gris y llenos de neuronas densamente conectadas, son bastante buenos para la supervivencia, pero quizá algo intrínseco en su diseño hace que les encanten las historias. Pensemos, sin ir

más lejos, en que nuestro éxito como seres sociales depende en parte de que poseamos buena información del tipo de quién está arriba, quién abajo, quién es fuerte, quién vulnerable o quién fiable. Debido a la utilidad adaptativa de esta información, nos sentimos inclinados a hacerle caso cuando la tenemos a nuestra disposición. Y cuando la poseemos, no es raro compartirla a cambio de dar un poco más de lustre a nuestro estatus social. Como la ficción está repleta de información de este tipo, nuestras mentes adaptativamente moldeadas podrían estar predispuestas a despabilar, escuchar y repetir, aunque la narración sea una fantasía. Así las cosas, la selección natural vería con buenos ojos unos cerebros cada vez más aptos para la vida social y miraría para otro lado ante su obsesión por contar historias.

¿Convencidos? A muchos (y yo me cuento en ese grupo) no les parece plausible que, con toda su capacidad para innovar, el cerebro haya quedado sujeto a un comportamiento del todo generalizado, por completo central y, pese a ello, adaptativamente irrelevante. Habrá aspectos de la experiencia de la narración que formen parte de algún paquete evolutivo, pero si relatar historias, escucharlas y contárselas a otros no pasase de ser un chismorreo marginal, cabría esperar que la evolución hubiera hallado el modo de desechar esa extravagancia. Entonces ¿cómo puede la narración hacerse con la ventaja adaptativa que la habría preservado?

En el momento de buscar una respuesta, debemos ser conscientes de las reglas del juego. Para muchos comportamientos, es demasiado fácil componer papeles adaptativos *a posteriori*. Y como no podemos poner a prueba esas sugerencias volviendo a ejecutar el desarrollo evolutivo, existe el peligro de quedarnos con una colección de explicaciones «hechas a medida». Las propuestas más convincentes son las que comienzan con un desafío adaptativo determinado, uno que, de ser superado, dé lugar a un mayor éxito reproductor, y luego argumentan que un comportamiento concreto (o un conjunto de comportamientos) está intrínsecamente bien diseñado para afrontar ese desafío. La explicación darwiniana de nuestro gusto por lo dulce es ejemplar. Los humanos requerimos una cantidad mínima de calorías para sobrevivir y reproducirnos. Ante la posibilidad de una devastadora escasez de calorías, una preferencia por los alimentos ricos en azúcares tiene un claro valor adaptativo. Si hubiéramos de diseñar la mente humana, conscientes de las necesidades fisiológicas y la naturaleza del medio ancestral, es fácil imaginar que programaríamos al cerebro humano para animar al cuerpo a comer frutos siempre que los encontrara. Así pues, que la selección natural haya llegado a esta misma estrategia no debe sorprendernos. La cuestión es si

hay consideraciones adaptativas análogas que nos hubiesen llevado a programar la mente humana para crear, contar y escuchar historias.

Sí las hay. La narración podría ser la manera que tiene la mente de ensayar para el mundo real, una versión cerebral de las actividades lúdicas documentadas en numerosas especies que proporcionan un medio seguro para practicar y perfeccionar habilidades críticas. El destacado psicólogo y hombre de la mente para todo, Steven Pinker, describe una versión especialmente escueta de la idea:

> La vida es como el ajedrez, y los planes son como esos libros de partidas de ajedrez famosas que los jugadores serios estudian para estar preparados por si alguna vez se encuentran en el mismo apuro[28].

Pinker imagina que, a través del relato, cada uno de nosotros construye un «catálogo mental» de respuestas estratégicas a las posibles dificultades de la vida, que podemos consultar cuando lo necesitemos. De esquivar a los taimados de la tribu a cortejar posibles parejas, organizar cacerías en grupo, evitar plantas venenosas, enseñar a los jóvenes, repartir la comida cuando es escasa y tantas otras cosas, nuestros antepasados hubieron de enfrentarse a un obstáculo tras otro mientras sus genes buscaban estar presentes en las siguientes generaciones. La inmersión en cuentos ficticios sobre la resolución de una gran variedad de desafíos parecidos habría tenido la capacidad de afinar las estrategias y respuestas de nuestros antepasados. Por consiguiente, codificar el cerebro para que se involucre en la ficción habría sido una forma ingeniosa de conferir a la mente, de una manera barata, segura y eficiente, una amplia base de experiencias sobre la que actuar.

Algunos estudiosos de la literatura se han mostrado en desacuerdo, argumentando que las estrategias que persiguen los personajes de la ficción al enfrentarse a desafíos inventados no son, por lo general, trasladables a la vida real, o por lo menos no aconsejables[29]. «Uno podría acabar dando vueltas como el demente y cómico don Quijote o la trágicamente ilusa Emma Bovary, que pierden el norte porque confunden la fantasía literaria con la realidad», es el jocoso resumen de esta crítica que nos ofrece Jonathan Gottschall[30]. Pinker, naturalmente, no sugiere que copiemos las acciones que vemos en las historias, sino que aprendamos de ellas, un enfoque, señala Gottschall, que tal vez se pueda transmitir mejor con un modesto cambio de metáfora a la introducida por el psicólogo y novelista Keith Oatley[31]: en lugar de un archivo mental, es mejor pensar en un simulador de vuelo. Las historias nos

ofrecen espacios de ficción en los que seguimos a unos personajes cuyas experiencias superan en mucho las nuestras. A través de unos ojos prestados, protegidos por el vidrio templado de la narración, observamos íntimamente una rica variedad de mundos exóticos. Es por medio de esos episodios simulados como nuestra intuición se ensancha y refina, se torna más perspicaz y más flexible. Cuando nos enfrentamos con algo que nos resulta extraño, no iniciamos una búsqueda cognitiva en un consultorio de la mente al estilo de Dear Abby [el equivalente en Estados Unidos a Elena Francis], sino que a través de historias internalizamos un sentido más rico en matices sobre cómo responder y por qué, y ese conocimiento intrínseco guía nuestro comportamiento futuro. Cultivar un sentido innato de la pasión heroica queda muy lejos de atacar molinos de viento, y es eso lo que saqué, como tantos otros lectores, al acabar la última página de las aventuras de Alonso Quijano.

Como metáfora de la utilidad adaptativa de las historias, ¿cómo programaríamos un simulador de vuelo? ¿Qué tipos de historias le haríamos ejecutar? Podemos obtener la respuesta en la primera página de cualquier curso de introducción a la escritura creativa. Un axioma de la narración de historias es la necesidad de conflictos. La necesidad de dificultades. La necesidad de enfrentamientos. Nos atraen los personajes que persiguen algo que los obliga a salvar obstáculos peligrosos, externos o internos. Sus viajes, literales o simbólicos, nos tienen pendientes de la pantalla, nos empujan a pasar de página. Está claro que las historias más cautivadoras buscan giros sorprendentes, entretenidos o sublimes en los personajes, la trama o la propia técnica de narración, pero para muchos, si se elimina el conflicto, la historia pierde interés. No es ninguna coincidencia que lo mismo pueda aplicarse a la utilidad darwiniana del contenido que ejecutamos en el simulador de vuelo que son las narraciones. Sin conflicto, sin dificultad, sin enfrentamiento, el valor adaptativo de las historias también se desvanecería. Un Josef K. feliz de confesar un crimen que desconoce y de cumplir anónimamente un castigo injustificado sería una lectura rápida. Y, sin otros ajustes narrativos, una historia con menos impacto. Lo mismo pasaría con una Dorothy que alegremente entrega los zapatos de rubí, abandona el camino de baldosas amarillas y se deja asimilar en Munchkinland. Los cielos claros, los motores perfectamente afinados y los pasajeros modélicos no son las simulaciones que mejoran la preparación de los pilotos. La utilidad de ensayar para el mundo real está en encontrarnos con situaciones a las que nos costaría responder sin preparación.

Es una perspectiva sobre las historias que también podría arrojar luz sobre por qué todos dedicamos un par de horas al día a construir cuentos que raramente recordamos y aún más raramente compartimos. Con lo de día me refiero a la noche, y los cuentos son los que producimos durante el período REM del sueño. Más de un siglo después de *La interpretación de los sueños*, de Sigmund Freud, todavía no hay consenso acerca de por qué soñamos. Leí la obra de Freud el primer año de instituto, para una clase que se llamaba Higiene (¡en serio!), una materia un tanto extraña que impartían los profesores de gimnasia y los entrenadores de deportes y se centraba en los primeros auxilios y las normas elementales de limpieza. Por falta de material para abarcar todo un semestre, la clase se rellenaba con presentaciones obligatorias de los estudiantes sobre temas considerados vagamente relevantes. Yo escogí el sueño y las ensoñaciones y probablemente me lo tomase demasiado en serio, porque leí a Freud y me pasé horas después de las clases rebuscando en la literatura científica. El momento de mayor asombro para mí, y también para la clase, fue el trabajo de Michel Jouvet, quien a finales de la década de 1950 exploró el mundo de las ensoñaciones de los gatos[32]. Dañando una parte del cerebro de los gatos (el locus cerúleo, para quien esté interesado en estas cosas), Jouvet conseguía eliminar un bloque de neuronas que en condiciones normales impiden que los pensamientos de un sueño estimulen movimientos corporales, de modo que estos gatos, al dormir, se agachaban, se arqueaban, bufaban y lanzaban las garras, supuestamente porque reaccionaban a depredadores y presas imaginarios. Si uno no supiera que los gatos en realidad estaban dormidos, pensaría que estaban practicando artes marciales, algún tipo de *kata* felino. Más recientemente, estudios sobre ratas con métodos de exploración neurológica más refinados han demostrado que, durante las ensoñaciones, sus pautas cerebrales se parecen a las que se registran cuando están despiertas y aprenden un nuevo laberinto; los investigadores pueden trazar el progreso de la mente de la rata mientras sueña y revive pasos realizados con anterioridad[33]. Cuando los gatos y las ratas sueñan, da desde luego la impresión de que están ensayando comportamientos relevantes para su supervivencia.

Nuestros antepasados comunes con gatos y roedores vivieron hace unos setenta u ochenta millones de años, así que extrapolar una conclusión especulativa entre especies separadas por miles de milenios es un ejercicio plagado de advertencias. Pero uno puede imaginar que nuestras mentes infundidas de lenguaje producen sueños con un propósito parecido: proporcionar entrenamiento cognitivo y emocional que mejore el

conocimiento y ejercite la intuición, sesiones nocturnas en el simulador de vuelo de las historias. Tal vez se deba a eso que en una vida de duración normal nos pasemos unos siete años con los ojos cerrados y el cuerpo prácticamente paralizado consumiendo historias de nuestro propia autoría[34].

Por sí misma, sin embargo, la narración de historias no es un medio solitario; es el medio más poderoso que poseemos para habitar otras mentes. Como especie profundamente social, la habilidad de desplazarnos de forma temporal a la mente de otra persona podría haber resultado esencial para nuestra supervivencia y nuestro dominio. Eso nos ofrece una razón de diseño relacionada para catalogar la capacidad de narración en el repertorio de los comportamientos humanos, es decir, para identificar la utilidad adaptativa de nuestro instinto para la narración.

La narración de historias y las otras mentes

El discurso profesional de los físicos utiliza una jerga especializada salpicada de ecuaciones, que no es precisamente lo que más despierta el interés de quienes se reúnen alrededor de una hoguera. Pero si uno sabe leer las ecuaciones e interpretar la jerga, las historias que cuenta pueden ser emocionantes. En noviembre de 1915, cuando un exhausto Albert Einstein, a punto de completar su teoría general de la relatividad, consiguió persuadir a las ecuaciones para que explicasen el enigma hasta entonces sin resolver de la órbita de Mercurio, que se desviaba ligeramente de las predicciones newtonianas, le embargó tal emoción que sintió palpitaciones en el corazón. Llevaba casi una década navegando por las traicioneras aguas de unas complejas matemáticas, y el resultado de aquel cálculo fue para él como avistar tierra. Parafraseando la valoración que después haría Alfred North Whitehead, significaba que la valiente aventura de Einstein lo había llevado sano y salvo a las orillas del conocimiento[35].

Nunca he realizado un hallazgo tan monumental. Pocos lo han conseguido. Pero incluso descubrimientos más prosaicos pueden provocar que el corazón se acelere con la emoción. En esos momentos, se siente una profunda conexión con el cosmos. De eso tratan, a decir verdad, las historias que esconden las matemáticas abstractas y el lenguaje especializado. Son historias que nos ofrecen una explicación íntima del universo, o de algo

dentro de él, de su nacimiento, su envejecimiento, su transformación. Las historias nos brindan la oportunidad de experimentar el mundo desde una perspectiva que de otro modo nos resultaría inalcanzable. Abren la puerta a ámbitos de la realidad que, en los ejemplos más gratificantes, son totalmente inesperados. Por medio de las matemáticas, confirmadas por experimentos y observaciones, se nos permite estar en comunión con un asombroso y extraño cosmos.

Las historias que desde hace miles de años venimos contando en los lenguajes naturales desempeñan un papel parecido. Por medio de las historias nos liberamos de nuestra perspectiva singular habitual y durante un breve instante habitamos el mundo de un modo distinto. Lo experimentamos a través de los ojos y la imaginación del narrador de historias. El simulador de vuelo de las historias es la puerta que nos da paso a los mundos idiosincrásicos que se desarrollan en otras mentes a nuestro alrededor. En palabras de Joyce Carol Oates, leer «es el único medio por el cual nos deslizamos, de manera involuntaria, a menudo inevitable, en la piel de otro, la voz de otro, el alma de otro […] y entramos en una conciencia que nos es desconocida»[36]. Sin las historias, las tonalidades y matices de otras mentes serían tan opacos como el micromundo sin el conocimiento de la mecánica cuántica.

¿Tiene alguna consecuencia evolutiva esta cualidad que distingue a las narraciones? Los investigadores así lo creen. Hemos prevalecido, en buena parte, porque somos una especie intensamente social. Somos capaces de vivir y trabajar en grupos. No en perfecta armonía, pero con la suficiente cooperación como para darle del todo la vuelta a los cálculos de supervivencia. No es solo la seguridad que confiere el número de los que somos. Es innovar, participar, delegar y colaborar en gran número. Y una parte esencial de esa vida en grupo es la constituida por lo que aprendemos de la variedad de experiencias humanas que absorbemos a través de las historias. En palabras del psicólogo Jerome Bruner: «Organizamos nuestra experiencia y nuestra memoria de los acontecimientos humanos sobre todo en forma de narraciones»[37], lo cual nos lleva a dudar de que «esa vida colectiva sea posible de no ser por la capacidad de los humanos para organizarnos y comunicar nuestra experiencia en forma de narraciones»[38]. Por medio de la narración exploramos el abanico de los comportamientos humanos, desde lo que esperamos socialmente a las más abyectas transgresiones. Somos testigos de la riqueza de motivaciones humanas, desde la ambición más desmedida a la brutalidad más reprensible. Nos encontramos con el abanico abierto de la

naturaleza humana, de la victoria más triunfal a la más dolorosa derrota. Tal como subraya el estudioso de la literatura Brian Boyd, la narraciones hacen que «el paisaje social sea más navegable, más amplio, más abierto y lleno de posibilidades», e infunde en nosotros un «deseo de comprender nuestro mundo no solo en términos de nuestra propia experiencia directa, sino a través de las experiencias de otros, y no solo experiencias reales»[39]. Tanto si se cuentan como mitos, historias, fábulas o relatos adornados de la realidad cotidiana, las narraciones son la clave para entender nuestra naturaleza social. Con la matemática podemos estar en comunión con otras realidades; con las historias, en comunión con otras mentes.

De niño solía mirar con mi padre la serie original de *Star Trek*, una tradición que luego repetí con mi propio hijo. Las historias morales y las obras sobre el espacio atraen fuertemente a quienes disfrutan con la exploración heroica servida con dosis de reflexión filosófica. Uno de los episodios más fascinantes, «*Darmok*», de la temporada de *Next Generation*, nos muestra el extraordinario papel de las historias como conformadoras de la sociedad. Los tamarianos, una raza alienígena de humanoides, se comunican únicamente mediante alegorías, por lo cual el lenguaje directo del capitán Picard los deja tan perplejos a ellos como al capitán su constante referencia a un conjunto de historias que desconoce. Al final, Picard logra comprender su cosmovisión, basada en alegorías, y consigue que se produzca un encuentro entre las mentes de las dos especies narrando *El poema de Gilgamesh*.

Para los tamarianos, los patrones de la vida y la comunidad están inscritos en una colección de historias compartidas. Nuestro esquema mental no es tan rígido; aun así, la narración nos proporciona uno de nuestros mapas conceptuales primarios. El antropólogo John Tooby y la psicóloga Leda Cosmides, pioneros de la psicología evolutiva, sugieren por qué: «Hemos evolucionado no hace tanto tiempo a partir de organismos cuya única fuente de información (no innata) era su propia experiencia individual»[40]. Y la experiencia, tanto si es para enfrentarse a las actuales muchedumbres de Times Square como para coordinar una cacería en grupo en las llanuras del África cenozoica, nos entrega la información en paquetes narrativos. Si estuviéramos dotados de la estupenda visión sobrehumana que nos permite ver las partículas a la que me referí en el capítulo anterior, los paquetes de experiencia tal vez tuvieran un carácter distinto: quizá organizáramos entonces nuestros pensamientos y recuerdos en términos de trayectorias de partículas o de funciones de onda cuánticas. Pero con los medios ordinarios de la percepción en los humanos, la paleta de la experiencia está coloreada

por la narración, y nuestras mentes, adaptadas a pintar el universo en forma de historias.

Pero una cosa es la forma y otra el contenido. Aunque la experiencia ha infundido en nosotros el embrujo por la estructura de la historia, usamos la narración para organizar nuestro conocimiento mucho más allá de los límites de los encuentros humanos. Los avances científicos nos brindan un magnífico ejemplo. La historia de una especie solitaria que se embarca a la conquista de los grandes misterios de la realidad y regresa con algunos de los conocimientos más asombrosos es, sin duda, material para el drama y la épica heroica. Pero el estándar de éxito del contenido científico de esas historias está a años luz de las medidas que aplicamos a las odiseas humanas. La razón de ser de la ciencia es apartar el velo que oculta la realidad objetiva, así que los relatos científicos deben responder a los estándares de la lógica y contrastarse mediante un escrutinio experimental replicable. Ese es el poder de la ciencia, pero también su limitación. Al seguir rigurosamente un estándar que minimiza la subjetividad, la ciencia se centra en resultados que trascienden a cualquier miembro concreto de la especie. La importante y profunda ecuación de Schrödinger nos dice mucho sobre los electrones, y es apasionante disponer de una ecuación que describe las idas y venidas de estas inquietas partículas con mayor precisión que la explicación de cualquiera de las otras cosas que ocurren en el planeta; pero la matemática apenas nos dice nada sobre Schrödinger o sobre el resto de nosotros. Este es el precio que orgullosamente paga la ciencia por una crónica cuántica que podría ser relevante mucho más allá de nuestro pequeño rincón de la realidad, que tal vez incluso sea válida en todo el espacio y para todos los tiempos.

Las historias que contamos de las idas y venidas de los personajes, reales o imaginarios, tratan de otra cosa. Iluminan la riqueza de nuestra ineluctablemente circunscrita y absolutamente subjetiva existencia. El estupendo cuento de Ambrose Bierce que trata de un breve instante en una ejecución militar en el puente sobre el río del Búho (Owl Creek Bridge), destila lo que Ernest Becker describió como el «atroz anhelo interior por la vida»[41]. Por medio del cuento, somos testigos de una versión amplificada de ese anhelo. Cuando imaginamos al exhausto pero exultante Peyton Farquhar dirigiéndose a abrazar a su esposa y el tirón del lazo de la horca lo arranca con fuerza, y a nosotros también, de su imaginaria fuga, nuestro sentido de lo humano se ensancha. A través del lenguaje, el cuento revienta los límites que de otro modo impondrían nuestras modestas experiencias. Mientras las palabras, escogidas con maestría, dirigen nuestra imaginación, adquirimos un

sentido más hondo de nuestra común humanidad y una comprensión más matizada de cómo sobrevivir como especie social.

Ya se trate de hechos o de ficción, de lo simbólico o de lo literal, el impulso por narrar es universal en los humanos. Asimilamos el mundo a través de los sentidos, y cuando perseguimos la coherencia y vislumbramos posibilidades, buscamos pautas, inventamos pautas, imaginamos pautas. Por medio de las historias articulamos lo que descubrimos. Es un proceso imparable que ocupa un lugar central en nuestra manera de ordenar la vida y dar sentido a la existencia. Las historias de personajes, reales o ficticios, que responden a situaciones familiares y extraordinarias, nos proporcionan un universo virtual del universo humano que inspira nuestras respuestas y refina nuestras acciones. Si en algún momento del futuro lejano somos finalmente anfitriones de unos visitantes de un mundo lejano, nuestros relatos científicos contendrán verdades que posiblemente ellos también hayan descubierto, y poco podrán ofrecerles. Pero nuestros relatos humanos, como le ocurrió a Picard con los tamarianos, les dirán quiénes somos.

Relatos míticos

Dentro de la comunidad científica, los hallazgos de la investigación ganan aceptación cuando explican datos enigmáticos, ofrecen soluciones a espinosos problemas teóricos o nos permiten hacer cosas que antes nos parecían imposibles. La gran mayoría de los avances científicos se quedan en los ámbitos restringidos de los expertos, pero algunos sobresalen y consiguen tener una amplia repercusión cultural. En su mayor parte, se trata de progresos relevantes para las grandes preguntas que trascienden los detalles científicos escabrosos: ¿cómo nació el universo? ¿Cuál es la naturaleza del tiempo? ¿Es el espacio lo que parece? Quienes llegan a comprender las respuestas más sofisticadas que da la ciencia a esas grandes preguntas casi con certeza alteran su perspectiva sobre la realidad. Que somos un pequeño planeta en órbita alrededor de una estrella mediana que se formó a partir de una fenomenal inflación del espacio primordial es un conocimiento que de forma constante ilumina mis reflexiones sobre el lugar que ocupamos en el cosmos. Que el paso del tiempo sea distinto para mí que para cualquiera que no se mueve exactamente conmigo es un hecho sorprendente sobre el que no

me canso de meditar. Que nuestra realidad, en apariencia tridimensional, pueda no ser más que una fina porción de un espacio mayor es una excitante posibilidad que me gusta imaginar.

A lo largo de los siglos, también las culturas han producido relatos particulares que han logrado alzarse sobre el resto e influir enormemente en la visión de la realidad que tiene su comunidad. Son los mitos de una cultura, historias respetadas hasta el punto de ganarse la cualidad de lo sagrado. Definir el mito resulta bastante difícil, pero aquí entenderemos que denota las historias que invocan agentes sobrenaturales para explorar las grandes preguntas de la cultura: su origen, sus antiguos rituales, sus modos particulares de imponer el orden en el mundo. Gracias a su longevidad, su gran atractivo y su carpeta de explicaciones fundamentales, los mitos se convierten en la base de un legado compartido, un corpus de tragedia y triunfo, de crónica y fantasía, de aventura y reflexión que define los pueblos y conforma las sociedades.

Hay una larga historia de estudiosos que nos ofrecen perspicaces maneras de leer e interpretar los mitos. A principios del siglo XX, el antropólogo sir James Frazer propuso que los mitos surgieron de los intentos por explicar los fenómenos enigmáticos de la vida y la naturaleza con los que se encontraron nuestros ancestros. El psicoanalista Carl Jung creía que a través de arquetipos (patrones universales que, según decía, son inherentes a la mente inconsciente) los mitos expresan cualidades compartidas de la experiencia humana. Joseph Campbell defendía la existencia de un «monomito», una plantilla maestra de los relatos mitológicos en la que un personaje renuente es llamado a la acción, se embarca en una aventura llena de peligros y ritos de paso que desafían a la muerte, y por fin regresa a su hogar, renacido como un héroe cuya epopeya sacude nuestro sentido de la realidad[42]. En tiempos más recientes, el filólogo Michael Witzel ha sugerido que donde una plantilla universal surge con mayor claridad no es al nivel de los mitos individuales, sino de tradiciones enteras: una línea argumental concatenada que, según sugiere, se extiende desde el principio del mundo hasta su desaparición. Invocando la lingüística, la genética de poblaciones y la arqueología, Witzel argumenta que las cualidades comunes a estas narraciones pueden trazarse hasta una forma ancestral de mitología que tuvo su origen en África hace quizá más de cien mil años[43].

Estas propuestas y otras, demasiado numerosas para mencionarlas, suscitan controversias y críticas apasionadas. Tienen sus defensores y sus detractores, sus auges y sus caídas. Algunos estudiosos sugieren que por

mucho que la idea de una única explicación global, que ayudaría a identificar las cualidades generales que conformaron nuestro legado ancestral, resulte seductora, la complejidad de la vida humana que se desarrolló durante una historia incierta y mal iluminada podría no prestarse a una explicación única. Para nuestros propósitos, la capacidad explicativa puede ser más limitada. La estudiosa de las religiones y escritora Karen Armstrong nos ofrece el más escueto de los resúmenes cuando observa que los mitos se encuentran «casi siempre enraizados en la experiencia de la muerte y el miedo a la extinción»[44], y aunque seamos un poco más conservadores y dejemos el «casi siempre» en un «a menudo» o «en muchos casos», todavía nos ofrece un luminoso faro para guiarnos en nuestro camino.

Veamos unos pocos ejemplos. Cuando Gilgamesh oye hablar de un hombre a quien al parecer los dioses han concedido la inmortalidad, no deja que nada lo frene, cruza vastos paisajes agrestes, se las ve con monstruosos escorpiones y navega por las Aguas de la Muerte, todo para aprender el secreto que le permita escapar a un final inevitable. La muerte ocupa un lugar central en la historia hindú de la diosa Kali, cuya perfección tanto enfurece a sus compatriotas divinos que le siegan la cabeza con un rayo[45]; la muerte se halla en el núcleo del mito de la creación de Kono, en el que Sa, la deidad de la muerte, cree que su hija ha sido abducida por el dios Alatangana, y se venga decretando la mortalidad para toda la humanidad; es un tema de importancia en Oceanía, en la historia de Maui, que pasa por las feroces fauces de la durmiente diosa-goblin, la Gran Hina de la Noche, decidido a conseguir la inmortalidad arrancándole el corazón, pero esta se despierta y con sus dientes como sables lo rasga en jirones[46]. Basta con abrir al azar la antología de los mitos del mundo que cada uno prefiera para encontrarse en poco tiempo a las puertas de la muerte. Estas historias sobre personajes que luchan por su vida y traen la muerte a la humanidad reverberan en los numerosos relatos que nos hablan de la aniquilación del mundo. Como Witzel señala, esa destrucción «puede tener lugar en forma de una última conflagración mundial: el *Götterdämmerung* [el ocaso de los dioses] o Ragnarök en las Eddas, el metal fundido en el mito de Zoroastro, el fuego y la danza destructora de Shiva en la India, el fuego en el mito de Munda, fuego/agua y otros en los mitos mayas y mitos similares de Mesoamérica, y la destrucción final de la Tierra por Atum en Egipto»[47]. Y si con eso no bastase, hay numerosos relatos de otras destrucciones con uso generoso del hielo, inviernos sempiternos y diluvios, populares en todo el mundo.

¿A qué se debe? ¿Por qué tanto peligro, destrucción y muerte? La narrativa invita al conflicto y las dificultades, y salvo que estemos decididos a retar las normas narrativas, sin esos elementos nos costaría encontrar una historia que explicar. Unamos a eso la grandiosidad de las preocupaciones que yacen en el núcleo del mito, como los orígenes de lugares o pueblos y las razones de las formas de ser, y los dilemas inherentes a estos relatos se llevan al extremo. Difícilmente podría ser de otro modo. En cuanto disponemos del lenguaje y del tiempo para contar historias, adquirimos la capacidad de vivir más allá del momento. Somos capaces de navegar cómodamente por el pasado y el futuro. Podemos planear y diseñar, coordinar y comunicar, anticipar y preparar. La utilidad de estas capacidades es manifiesta, pero esa agilidad mental nos lleva también a vivir con el recuerdo de quienes fueron y ya no son. Inferimos la pauta, nunca violada, de que cada vida encuentra su fin. Reconocemos que vida y muerte están unidas en férreo abrazo. Son cualidades duales de la existencia. Reflexionar sobre los orígenes es plantear preguntas sobre los finales. Reflexionar sobre cómo vivir la vida es meditar sobre la ausencia de vida. El carácter inevitable de la muerte es algo que, una vez comprendido, se nos impone en el aquí y ahora, y, cabe pensar, con mayor fuerza aún en unas épocas en las que la llegada del fin podía ser mucho más caprichosa. No es de extrañar que la muerte y la destrucción adquieran tal prominencia como tema.

Pero ¿por qué poblar estos antiguos relatos de gigantes enajenados, serpientes que escupen fuego por la boca, hombres con cabeza de toro y personajes por el estilo? ¿Por qué aterradores cuentos fantásticos en lugar de un aterrador realismo? ¿Por qué narrar más al estilo de *Poltergeist* o *El exorcista* que de *Salvar al soldado Ryan* o *Reservoir Dogs* ? El antropólogo cognitivo Pascal Boyer, a partir de trabajos anteriores del científico cognitivo Dan Sperber[48], sugiere una respuesta. Para que un concepto capte nuestra atención con la fuerza suficiente para recordarlo y transmitirlo a otros, debe ser lo bastante novedoso como para sorprendernos, pero no tan extravagante como para que al momento nos parezca ridículo[49]. ¿Gente invisible? Claro que sí, pero solo si la invisibilidad es lo único contrario a la intuición. ¿Un río que resuelve problemas de análisis matemático y nos los canta con el tema de *M*A*S*H* ? Absurdo, y por tanto ignorado por casi todos y olvidado al momento. En línea con los temas grandiosos de los mitos, los protagonistas que en ellos encontramos son también grandiosos constructos de la imaginación humana, pero solo un poco contrarios a la intuición. No debe sorprender, pues, que tengan forma física, pensamientos, incluso distintas

personalidades que nos resulten del todo familiares, aunque sus poderes superen lo que nuestra experiencia nos lleva a esperar.

El lenguaje pone un cilindro más en el motor creativo del mito. En cuanto disponemos de la capacidad de describir la estructura de las cosas ordinarias (las violentas tempestades, los árboles en llamas, las escurridizas serpientes), el lenguaje nos ofrece un Mr. Potato listo para narrar, para mezclar y juntar libremente. Rocas gigantes y personas que hablan están a un paso del cruce lingüístico, mucho más cautivador, de rocas que hablan y personas gigantes. El lenguaje da rienda suelta a la capacidad cognitiva que nos permite imaginar todo tipo de combinaciones improvisadas que nos llevan a la novedad[50]. Las mentes que adquirieron este poder fueron capaces de ver problemas viejos con nuevos ojos. Mentes capaces de innovar. Mentes que, con el tiempo, controlarían y cambiarían el mundo.

También alimenta el torbellino creativo nuestra teoría de la mente, nuestra tendencia innata a atribuir una mente a todo aquello que nos ofrezca la menor indicación de poseer una voluntad. Como en nuestra discusión anterior sobre la conciencia, cuando nos encontramos con otras personas, aunque sea a distancia, sin interacción directa, al momento las dotamos de mentes más o menos parecidas a la nuestra. En términos evolutivos, eso es bueno. Otras mentes pueden promover comportamientos que nos conviene anticipar. Lo mismo vale para los animales, de modo que también de manera instintiva les atribuimos intenciones y deseos. Pero a veces, tal como subrayan el psicólogo Justin Barrett y el antropólogo Stewart Guthrie, nos pasamos de frenada[51]. En términos evolutivos, eso también puede ser bueno. Confundir un arbusto lejano iluminado por la luz de la luna con un león que reposa no tiene mayor consecuencia. Pensar que el ruido que acabamos de oír lo produjo una rama movida por el viento cuando en realidad es un leopardo que nos acecha puede ser mortal. Cuando atribuimos voluntad a la naturaleza, mejor pasarse de la raya que quedarse cortos (con un límite, claro está), una lección que se han tomado muy en serio las moléculas de ADN que se han transmitido con éxito y los vehículos narradores en los que habitan.

Hace varias décadas, durante lo que para mí fue una rara expedición de acampada, me retaron a pasar un breve tiempo solo en el bosque. Equipado con una lona impermeable, un saco de dormir, tres cerillas, una pequeña lata, un bolígrafo y un diario, me encontré en la soledad más honda que nunca había conocido. Se mire como se mire, desde una perspectiva práctica o psicológica, no estaba preparado para ello. Me las apañé para hacerme un techo apuntalando la lona en unas ramas bien escogidas, pero me quedé sin

cerillas en mi primer intento infructuoso de encender un fuego. Cuando el sol comenzó a ponerse, y el terror a salir, desenrollé el saco de dormir, me colé en su interior y me quedé mirando la lona suspendida a poca distancia sobre mi rostro. Estaba en el umbral del pánico. Para mis oídos habituados a la ciudad y mi atribulada imaginación, cada ráfaga de viento, cada crepitación era un oso o un puma. No me hacía ilusiones de heroísmo, pero cada interminable segundo me parecía un rito de paso que desafiaba a la muerte. Saqué el bolígrafo y tracé dos ojos redondos, una nariz manchada y una boca torcida que subía un poco por los extremos; el bolígrafo sobre lona no es lo ideal, pero aquellas líneas azules discontinuas sobre la textura de la lona plastificada fueron suficientes. Todavía estaba solo, pero ya no lo sentía tanto. Si cada uno de los ruidos nocturnos del bosque estaba dotado de mente, mi dibujo también. Sería un náufrago durante tres días, pero había creado mi propio Wilson.

La evolución ha instilado en nosotros la tendencia a sentir nuestro entorno repleto de cosas que piensan y sienten, que a veces imaginamos ofreciéndonos ayuda y consejo, pero más a menudo conjurándose contra nosotros y tramando, traicionándonos una y otra vez, atacándonos y vengándose. Dotar por exceso a los sonidos y movimientos del mundo de mentes que asociamos a peligros y destrucción puede salvarnos la vida. Disponer de la flexibilidad cognitiva para mezclar elementos de realidad en invenciones fantasiosas puede alimentar la innovación. Empoderar a unos protagonistas por lo demás ordinarios con cualidades sobrenaturales sorprendentes capta la atención y facilita la transmisión cultural. Combinados, estos elementos iluminan los tipos de historias que cautivaron la imaginación de nuestros antepasados y proporcionaron la guía narrativa para sortear los obstáculos del antiguo mundo.

Con el tiempo, los mitos más persistentes se convertirían en la semilla de una de las fuerzas más transformadoras del mundo: la religión.

7

CEREBRO Y CREENCIAS

De la imaginación a lo sagrado

Imaginemos por un momento que cuando por fin establecemos contacto con seres inteligentes de otro planeta, estos también nos relatan una historia repleta de intentos de hallar significado. Una forma de vida capaz de construir telescopios, de fabricar naves espaciales, de abrirse al cosmos y escuchar su parloteo, es una vida con la capacidad de reflexionar sobre ella misma. A medida que la inteligencia madura, el propio impulso por explorar y entender se manifiesta como un anhelo de infundir significado en la experiencia. Cuando se ha dado respuesta a suficientes preguntas sobre el cómo, enseguida surgen las del porqué. Aquí en la Tierra, la supervivencia obligó a nuestros antepasados a ser técnicos. Necesitaban aprender a tallar la piedra, a modelar el bronce o el hierro. Necesitaban dominar las técnicas de la caza, la recolección y la agricultura. Pero al mismo tiempo que se ocupaban de lo esencial para sobrevivir, se enfrentaban también a las mismas cuestiones a las que nos enfrentamos nosotros, preguntas sobre el origen, el significado y el propósito. Sobrevivir nos lleva a indagar por qué importa sobrevivir. Inevitablemente, los técnicos se convirtieron en filósofos. O científicos. O teólogos. O escritores. O compositores. O músicos. O artistas. O poetas. O devotos de miles de variaciones y combinaciones de sistemas de pensamiento y expresión creativa que prometen aprender algo nuevo sobre esas preguntas que nos reconcomen por dentro mucho después de llenar el estómago.

Como dejan bien claro las historias y los mitos que perduran, la más persistente de esas preguntas es existencial. ¿Cómo comenzó el mundo? ¿Cómo acabará? ¿Cómo podemos estar aquí en un momento y haber

desaparecido un instante después? ¿Adónde vamos? ¿Qué otros mundos puede haber?

Imaginar otros mundos

Hace cien mil años, en algún lugar de la región de la Baja Galilea, en el actual Israel, un niño de cuatro o tal vez cinco años, que quizá jugaba tranquilamente o hacía alguna travesura, sufrió un golpe traumático en la cabeza. No sabemos su género, pero supongamos que era una pequeña niña. La causa de la lesión también nos es desconocida. ¿Tropezó y rodó por una cuesta, cayó de un árbol, recibió un castigo excesivo? Lo que sí sabemos es que el impacto le abrió el cráneo por el lado frontal derecho provocando unos daños cerebrales que soportó hasta los doce o trece años, cuando falleció. Estos hechos los hemos deducido de los restos de un esqueleto hallado en Qafzeh, uno de los lugares de enterramiento más antiguos, cuya excavación comenzó en la década de 1930. Aunque en el yacimiento se encontró también los restos de otros treinta y seis cuerpos, la tumba de la adolescente es peculiar. Sobre su pecho yacía la cornamenta de un ciervo, con uno de los extremos sobre su mano, y esta disposición, a juicio de los investigadores, es indicio de un enterramiento ceremonial. ¿Es posible que la cornamenta no sea más que un adorno no intencionado? Puede ser. Pero es fácil seguir el juicio del equipo de investigación e imaginar a Qafzeh 11, que es como se conocen estos restos, mientras le dan sepultura en un ritual representado hace cien mil años por unos antiguos humanos que ya pensaban en la muerte y, tal vez, en lo que pudiera venir después[1].

Por tentadoras que sean las conclusiones sobre unos hechos ocurridos hace tanto tiempo, los yacimientos de enterramientos de eras posteriores hacen más plausible la interpretación. En 1955, en el pueblo de Dobrogo, a unos doscientos kilómetros al noreste de Moscú, Aleksandr Nacharov maniobraba una excavadora en la Fábrica de Cerámica Vladímir cuando observó que, mezclados con el lodo pardo amarillento, había extraído algunos huesos. Resultaron ser los primeros de muchos que se irían desenterrando durante varias décadas en Sungir, uno de los yacimientos más célebres de la era paleolítica. Una de las sepulturas es especialmente extraordinaria: un niño y una niña, de unos diez y doce años en el momento de la muerte, yacían

enterrados cara a cara en lo que parecía un eterno abrazo entre dos jóvenes mentes. Inhumados hace más de treinta mil años, sus restos fueron adornados con uno de los más elaborados ajuares funerarios jamás descubiertos. Además de diademas confeccionadas con dientes de zorro ártico decorados, había muchos objetos de marfil, como brazaletes, más de una docena de lanzas, discos perforados y, para delicia de los fans de Liberace, más de diez mil cuentas talladas que probablemente estuviesen cosidas a los ropajes de los niños. Los investigadores han estimado que a la furiosa velocidad de cien horas por semana, a un artesano le habría llevado fácilmente más de un año elaborar estos ornamentos[2]. Tan gran inversión de tiempo nos ofrece, como poco, un fuerte indicio de que los enterramientos rituales formaban parte de una estrategia para trascender a una muerte definitiva. El cuerpo podía cesar, pero alguna cualidad vital, que se podía mejorar o apaciguar, honrar o gratificar mediante elaborados accesorios funerarios, persistía.

El antropólogo del siglo XIX Edward Burnett Tylor argumentó que los sueños actuaron como una influencia generalizada que guio a los primeros humanos a esta misma conclusión[3]. Podemos imaginar que aquellas aventuras nocturnas que iban de lo curioso a lo extravagante les habrían sugerido de manera persistente un mundo más allá del que se abre ante nuestros ojos. Despertarse confortado o atemorizado tras la visita de un amigo o pariente fallecido es quedarse con la impresión de que todavía existe. No como existía antes. No aquí, claramente. Pero de alguna forma etérea, sigue estando cerca. Los escritos que nos han llegado, aunque mucho más tardíos, apoyan esta conjetura con abundantes ejemplos en que los sueños abren ventanas a realidades invisibles. Los antiguos sumerios y egipcios interpretaban estos últimos como instrucciones divinas, y por todo el Antiguo y Nuevo Testamento, lo divino se revela a menudo a través de sueños. Incluso en la era moderna los estudios de sociedades cazadoras aisladas, como los aborígenes australianos, revelan el papel esencial del Tiempo del Sueño, un domino eterno donde toda la vida tiene su origen y al que toda la vida regresará. Los estados de trance durante el Tiempo del Sueño también son comunes en diversas tradiciones que practican rituales animados por música de percusión y danzas extenuantes que pueden prolongarse durante horas e inducen ensoñaciones hipnóticas que los participantes describen como una traslación a otros planos de la realidad[4].

Durante las horas de vigilia tampoco habrían faltado episodios sugerentes de una realidad más allá de lo visible: fuerzas poderosas que se dejan notar en la tierra y en los cielos, sucesos caprichosos de la existencia diaria, frecuentes

peligros que pueden llevar a la muerte. El éxito evolutivo en un contexto social predispuso a nuestro cerebro a atribuir experiencias comunes a las acciones de otros seres. Cuando golpeaba el rayo o cuando llegaban las inundaciones o la tierra temblaba, seguíamos imaginando que todo ello era responsabilidad de un ser pensante. Enfrentados a todo ello, podemos imaginar fácilmente que nuestros antepasados reconocieran de manera implícita los límites de su influencia sobre un mundo lleno de incertidumbre y concibieran personajes que habitasen ese ámbito invisible, donde estarían dotados de poderes de los que ellos carecían.

Voluntaria o no, fue una respuesta espectacularmente inteligente, pues nos permitió hilvanar sucesos por lo demás aleatorios en tramas coherentes: imaginar dominios invisibles poblados por personaje familiares o inventados. Poner nombre y rostro, realista o fantástico, a quienes controlan lo que hacemos y ejercen el control último sobre nuestro destino. Redefinir la mortalidad como el umbral franqueado por Qafzeh 11, sus dos docenas de compañeros, y generaciones y generaciones de ancestros de camino a aquellos mundos invisibles pero ascendentes. Contar una y otra vez sus historias, y con esas narraciones invocar las personalidades, las debilidades, los rencores, los celos y toda suerte de comportamientos humanos que, desplegados en mundos cercanos, expliquen sucesos de nuestro propio mundo que de otro modo no sabemos explicar.

Nuestros primeros escarceos con el arte nos ofrecen más indicios de una preocupación por el más allá. En paredes de roca de todo el mundo los exploradores han encontrado decenas de miles de imágenes pintadas, algunas de ellas datadas de hace más de cuarenta mil años. Estas pinturas nos revelan toda una casa de fieras, con leones y rinocerontes, pero también híbridos creativos, mitad mujer y mitad ciervo, o mitad pájaro y mitad hombre. La forma humana queda en un plano secundario, a menudo ejecutada con un boceto rudimentario, si es que llega a aparecer. Las colecciones de impresiones de las manos son abundantes, y se nos muestran como caóticas superposiciones de contornos dibujados cuyo significado solo podemos conjeturar, esforzándose tal vez por tocar otro dominio, anhelando adquirir la durabilidad aparentemente infinita de la roca, imprimiendo una ornamentación exuberante, o nada más que una versión temprana del «Kilroy estuvo aquí». Las intenciones se desvanecen y solo nos queda imaginar. Al hacerlo, reconocemos en la danza del hechicero y el bisonte que agoniza los primeros esfuerzos de una fuerza creativa que nos parece muy nuestra. Más

allá de la superficie de la roca, nos vemos a nosotros mismos devolviéndonos la mirada.

Todo esto es emocionante, pero peligroso. El encuentro con la cultura de nuestros antepasados es cautivador, pero puede llevarnos a atribuir a su obra creativa un significado indebido. Quizá el arte rupestre no vaya más allá de unos bosquejos ociosos de una mente que comienza a ser consciente. O, en una descripción más elevada, quizá el arte rupestre testimonie un antiguo impulso estético, lo que algunos han llamado «el arte por el arte»[5]. Inferir qué inspiraba a quienes vivieron hace cientos de siglos resulta arriesgado, y es conveniente no llevar ese ejercicio demasiado lejos. Pero cuando se piensa en lo difícil que era llegar a algunos de estos lugares (el arqueólogo David Lewis-Williams describe cómo los actuales exploradores y, presumiblemente, los artistas rupestres de entonces «se agachaban y se arrastraban por angostos corredores subterráneos durante más de un kilómetro, se deslizaban por el lodo y vadeaban lagos oscuros y ríos ocultos»[6]), la explicación del «arte por el arte» no parece tan plausible. Es probable que incluso a aquellos de nuestros remotos antepasados a los que más llamara la vida bohemia escogieran maneras más fáciles de satisfacer un impulso puramente artístico.

Así que tal vez nuestros ancestros artistas realizasen ceremonias mágicas para asegurar el éxito en la caza, una idea promovida a principios del siglo XX por el arqueólogo Salomon Reinach[7]. ¿Qué importa arrastrarse por las cuevas para pintar si con eso se asegura una deliciosa y necesaria cena?[8]. O, como sugería Lewis-Williams al desarrollar ideas previamente comentadas por el historiador de la religión Mircea Eliade, quizá el arte rupestre sea el resultado de viajes mentales chamánicos. A medida que las narraciones míticas ganaron seguidores, los chamanes, líderes espirituales que adquirían prominencia convenciendo a otros, y quizá también a ellos mismos, de su capacidad para viajar a esferas invisibles de otras realidades, se convirtieron en intermediarios entre este mundo y el siguiente. La inspiración para las pinturas paleolíticas podría encontrarse en las visiones de chamanes durante los trances, en los que interactuaban con personajes míticos o servían de intermediarios para animales imaginarios.

El asombroso parecido entre composiciones separadas por continentes enteros y por miles de años apunta a una explicación única y general del arte rupestre. Esa proposición quizá sea demasiado ambiciosa, pero hay una característica de la que el arqueólogo Benjamin Smith está del todo convencido:

> La cavernas no eran simples «lienzos», sino lugares donde se realizaban rituales, donde las personas se comunicaban con espíritus y antepasados que habitaban en otra esfera, lugares llenos de significado y relevancia[9].

Para Smith y muchos otros investigadores del mismo parecer, nuestros antepasados creían profundamente que el arte y el ritual les permitían influir en las fuerzas espirituales. Pese a tan confiada conclusión, cuando echamos la mirada veinticinco, cincuenta, quizá incluso cien mil años atrás, los detalles se difuminan, y es improbable que lleguemos nunca a saber de manera definitiva lo que motivó a nuestros antepasados remotos. No obstante, comienza a vislumbrarse una respuesta. Vemos cómo nuestros ancestros realizaban ceremonias de enterramiento, despedidas rituales hacia otros mundos; cómo creaban arte que imaginaba realidades más allá de la experiencia; cómo narraban mitos con espíritus poderosos, inmortalidad y vida más allá de la muerte; en pocas palabras, cómo hilvanaban los hilos de aquello que generaciones más tarde llamaríamos religión, y no es necesario forzar la mirada para percibir en ese tejido el reconocimiento de la impermanencia de la vida.

Las raíces evolutivas de la religión

¿Podemos valernos de ese antiguo auge de la religiosidad para articular una explicación de la amplia adopción de prácticas religiosas en todo el mundo? Los defensores de la ciencia cognitiva de la religión, como Pascal Boyer, sostienen que sí. Este pensador sugiere que a través del más amplio espectro de la experiencia religiosa se puede encontrar una base evolutiva que se aplica de manera uniforme:

> La explicación de las creencias y conductas religiosas debe encontrarse en el funcionamiento de la mente humana. Y con ello me refiero a todas las mentes humanas, no solo a las de las personas religiosas […] porque lo que importa aquí son propiedades de las mentes que se encuentran en todos los miembros de nuestra especie con cerebros normales[10].

La tesis es que existen características inherentes al cerebro humano modeladas durante cientos de miles de años por la incansable batalla por la supremacía evolutiva, que nos predisponen a la convicción religiosa. No, desde luego, porque tengamos genes para los dioses o dendritas devotas. Boyer se basa en el conocimiento del cerebro desarrollado en décadas recientes por científicos cognitivos y psicólogos evolutivos que superan la familiar metáfora de la mente como computadora. En lugar de asemejar el cerebro a un ordenador de amplio espectro que espera a ser programado por la experiencia, lo conciben más bien como una computadora especializada, con programas innatos diseñados por la selección natural para incrementar las perspectivas de supervivencia y reproducción de nuestros antepasados[11]. Esos programas sustentan lo que Boyer califica de «sistemas de inferencia», procesos neuronales especializados preparados para responder a determinados tipos de desafíos, desde tirar una lanza a cortejar parejas o establecer alianzas, que habrían determinado qué genes acabarían transmitiéndose a la siguiente ronda de selección y cuáles no. La tesis central de Boyer es que esos sistemas de inferencia son fáciles de apropiar para que respondan a las cualidades intrínsecas de la religión.

Ya conocemos uno de esos sistemas de inferencia: nuestra teoría de la mente, con la cual imputamos el tipo de voluntad que experimentamos en nuestro interior a las entidades que encontramos en el mundo exterior. La tendencia adaptativamente beneficiosa a imputar esas voluntades en exceso clarifica por qué nos resulta tan fácil imaginar que nuestro entorno (en el submundo o en los cielos) está habitado por mentes atentas. Otros sistemas de inferencia son nuestra comprensión intuitiva de la psicología y de la física: sin instrucción formal, todos poseemos un conocimiento básico de las capacidades de las mentes y los cuerpos. Si juntamos estos sistemas de inferencia a la atracción que sentimos hacia conceptos que solo contradigan levemente nuestra intuición (conceptos que, como se recordará, violan poco de lo que intuitivamente esperamos), ya no resulta tan misterioso que nos aferremos a ideas como las de los espíritus y los dioses (agentes dotados de mentes parecidas a la nuestra, pero que difieren en su corporeidad y poderes, tanto psicológicos como físicos). Los cerebros normales también poseen sistemas de inferencia social que, por ejemplo, están atentos a las relaciones que mantenemos para asegurar un trato justo. Si yo hago algo por otra persona, ella tendrá que hacer algo por mí, y que no se equivoque, llevo la cuenta. Esta variedad recíproca de altruismo podría estar en el origen de la naturaleza transaccional de la relación que los creyentes suelen mantener con

los seres sobrenaturales que pueblan las tradiciones religiosas: yo hago sacrificios, hago plegarias, hago el bien, pero si en el futuro estoy en apuros, espero tener cubiertas las espaldas. Sin embargo, cuando ocurre algo malo, estamos más que dispuestos a atribuirlo a que hemos fallado individual o colectivamente, a que no hemos satisfecho las expectativas divinas.

En su libro *Religion Explained*, Boyer desarrolla estas ideas plenamente; otros investigadores han propuesto variaciones a partir de aproximaciones parecidas[12]. Pero el bosquejo que trazo aquí transmite lo fundamental de su enfoque: la evolución del cerebro se desenvolvió en una batalla por la supervivencia, y el cerebro que salió victorioso posee cualidades que acogen la religión con los brazos abiertos. Es un ejemplo de lo que antes califiqué de paquete evolutivo. Una predilección por la creencia religiosa quizá no tuviera valor adaptativo por sí sola, pero viene en un paquete con varias otras cualidades del cerebro que sí fueron seleccionadas a causa de sus funciones adaptativas. Eso no significa que todos hayamos de ser religiosos, del mismo modo que nuestro gusto por lo dulce, fruto de la selección natural, no significa que todos nos muramos por las rosquillas con azúcar. Lo que significa es que los sistemas de inferencia del cerebro son especialmente sensibles a las características que suelen manifestarse en las religiones del mundo. De hecho, esa resonancia es la razón misma de que hayan persistido en las religiones del mundo. Sean dioses o fantasmas, demonios o diablos, santos o almas, los entes que concibe la religión se erigen en directores virtuosos de una mente humana siempre en evolución. Estamos atentos a ellos, actuamos en concordancia con ellos, los promulgamos, así que se divulgan ampliamente[13].

¿Eso es todo? ¿La supervivencia de los más aptos modificó nuestras mentes, y esas mentes aptas resultaron ser fácilmente inculcadas con una susceptibilidad religiosa? ¿Qué pasa con el papel que suponemos que la religión desempeñó (y para muchos sigue desempeñando) como explicación de lo aparentemente inexplicable, desde el origen de la vida y el universo al significado de la muerte? Boyer y muchos otros pensadores que defienden perspectivas parecidas no niegan el papel de la religión en estas cuestiones, pero argumentan que esas consideraciones son insuficientes para explicar por qué surgió esta y por qué posee las características que posee. El problema que se ignora en la religión es la mente humana, y sin un foco primario centrado en la naturaleza evolutiva de la mente, nos dejamos fuera la fuerza dominante.

El argumento que esgrimen Boyer y otros investigadores es convincente y perspicaz. Pero como ocurre con todas las teorizaciones en el

espectacularmente complejo ámbito del cerebro, la mente y la cultura, es difícil alcanzar conclusiones definitivas que convenzan a todas las mentes modernas, o al menos a las que piensan a fondo sobre estas preguntas. Además, aunque la ciencia cognitiva de la religión consiguiese revelar que poseemos una susceptibilidad inherente hacia un modo religioso de pensamiento, sigue quedando mucho espacio para que la religión continúe siendo más que un apéndice de la evolución, más que un mero subproducto de remotas adaptaciones cognitivas. Como han argumentado otros investigadores, tal vez la religión sea ubicua porque ha hecho su propia contribución a nuestra *fitness* adaptativa.

El sacrificio por los demás

A medida que los clanes crecían, las tribus de cazadores-recolectores se enfrentaron a un problema crítico. ¿Cómo se podía asegurar la cooperación y lealtad en comunidades de personas cada vez más grandes? En los grupos familiares, una idea que se remonta a Darwin y que en décadas posteriores desarrollaron varios científicos de renombre, entre ellos Ronald Fisher, J. B. S. Haldane y W. D. Hamilton, sugiere que la evolución por medio de la selección natural puede resolver la cuestión sin mayor problema[14]. Soy leal a mis hermanos, a mis hijos y a otros parientes cercanos porque compartimos una buena parte de nuestros genes. Cuando salvo a mi hermana del ataque de un elefante, aumento la probabilidad de que segmentos genéticos idénticos a los míos persistan y se transmitan a generaciones posteriores. Yo, naturalmente, no tengo que saber nada de eso. Mientras realizo mi galante proeza, no calculo las abundancias relativas en el futuro acervo genético. Lo que ocurre es que, de acuerdo con la lógica habitual darwiniana, mi inclinación instintiva a proteger a mis parientes, incluso a sacrificarme por grupos de mis parientes, quedará preservada por la selección natural, que de este modo promoverá que perdure ese comportamiento en la progenie que comparta una parte sustancial de mi perfil genético. El razonamiento es sencillo, pero plantea una pregunta: cuando los grupos crecen más allá de un conjunto de parientes cercanos, ¿hay alguna zanahoria genética que pueda sostener el palo de la cooperación?

Si hubiera alguna manera de convencerme para creer, o por lo menos para actuar como si los miembros de ese grupo más amplio formasen parte de mi gran familia, el problema quedaría resuelto. Pero ¿cómo se consigue eso? Antes hemos comentado que, al mejorar nuestra comprensión de otras mentes, las narraciones podrían haber facilitado la vida en comunidad. Tras desarrollar ideas propuestas a principios del siglo XX por el sociólogo Émile Durkheim, algunos investigadores, como el biólogo evolucionista David Sloan Wilson, llevan aún más lejos este papel adaptativo[15]. La religión también es una narración, una historia enriquecida con doctrinas, rituales, costumbres, símbolos, arte y normas de conducta. Al envolver en un aura de sacro este tipo de actividades, la religión amplía el club del parentesco; permite la entrada a individuos no emparentados que de este modo sienten que forman parte de un grupo con fuertes vínculos. Aunque el solapamiento genético sea mínimo, estamos predispuestos a trabajar juntos y protegernos unos a otros gracias a la religión que nos une.

Esa cooperación importa. Y mucho. Como hemos visto, los humanos prevalecieron en no poca medida porque nuestra especie goza de la capacidad de unir fuerza e intelecto, de vivir y trabajar en grupo, de dividir las responsabilidades y satisfacer eficazmente las necesidades del colectivo. La mayor cohesión social habría convertido a quienes vivían en grupos unidos por la religión en una fuerza más formidable en el mundo ancestral, y eso, de acuerdo con esta línea de razonamiento, habría asignado un papel adaptativo a la afiliación religiosa.

Es una perspectiva que ha alimentado décadas de debate. Algunos investigadores se echan las manos a la cabeza cada vez que alguien presenta la cohesión de grupo como explicación evolutiva, pues la ven como una idea trillada para explicar unos comportamientos presumiblemente prosociales cuyo valor adaptativo se ha mostrado esquivo[16]. Además, el valor adaptativo de la propia cooperación es en sí mismo una cuestión compleja: en todo grupo de individuos que cooperan hay miembros egoístas que abusan del sistema. Al aprovecharse de afables compañeros, estos individuos codiciosos pueden adquirir una porción indebida de los recursos y, de este modo, aumentar injustamente la probabilidad de sobrevivir y reproducirse. Tras transmitir su comportamiento egoísta, su progenie tenderá a comportarse del mismo modo, y con el tiempo acabará extinguiendo a quienes se fían de los demás, y, con ellos, sus tendencias religiosas. Adiós al valor adaptativo de la religión.

Los defensores de la base religiosa de la cohesión social reconocen el problema, pero hacen hincapié en que esa es solo la mitad de la teoría. Dentro

de los confines de un grupo aislado de miembros cooperadores, los infiltrados egoístas ganarían, sin duda. Pero los grupos de interés, los cazadores-recolectores del Pleistoceno, no vivían aislados. Interactuaban. Luchaban. Y según una lectura del registro arqueológico, sus batallas eran mortales. En este contexto, un conjunto de miembros cooperadores, comprometidos con el bienestar del grupo, probablemente saldría mejor parado. En palabras del propio Darwin, «cuando dos tribus de hombres primitivos que habitaban en el mismo lugar competían, si, a igualdad de condiciones, una de ellas incluía un gran número de miembros valerosos, empáticos y fieles, siempre dispuestos a avisar a los demás de los peligros, a ayudarse y defenderse, esa tribu tendría más éxito y conquistaría a la otra»[17]. Además, aquellos cuyo servicio estuviese inspirado por la devoción a los antepasados fallecidos o a deidades vigilantes habrían sido mucho más fiables y fervientes en su compromiso con la causa[18]. Por consiguiente, para determinar qué rasgos se habrían transmitido al acervo genético, debemos tomar en cuenta no solo la dinámica dentro de los grupos, que favorece a los egoístas, sino también la dinámica entre grupos, que favorece a los cooperadores. Si a lo largo de miles de generaciones predominase el éxito de la dinámica entre grupos en el cómputo de la supervivencia, se afianzaría la lealtad de grupo y triunfaría la cohesión social promovida por la religión.

Así imaginada, la victoria no pasa de ser provisional, pues depende de la suposición del predominio de las fuerzas entre grupos respecto a las fuerzas dentro de estos, y no todo el mundo está convencido de que esta sea una descripción precisa de la vida y la muerte durante nuestro pasado como cazadores-recolectores. Además, los escépticos se sienten envalentonados por una explicación del comportamiento de cooperación que surge de consideraciones mucho más prosaicas: la teoría matemática del juego. Entre los extremos del comportamiento egoísta y el altruista hay innumerables estrategias entre las que cada miembro de un grupo puede elegir. Uno quizá tienda a ser altruista, pero si otro lo traiciona muchas veces, le sale con fuerza el lado egoísta. Una vez perdida la confianza, quizá no le ofrezca ninguna oportunidad más, o quizá, si el otro le hace unos cuantos favores, le proporcione la ocasión de ganársela de nuevo. Y así de tantas otras maneras. En un grupo grande poblado por individuos comprometidos con una gran diversidad de estrategias, ¿qué ocurre? Pues que distintas estrategias de cooperación confieren distintos valores de supervivencia, de modo que a lo largo de las generaciones se verán sometidas a la selección darwiniana. Con la ayuda de modelos matemáticos y simulaciones numéricas, los investigadores

han enfrentado varias estrategias, y han descubierto que una en particular, la de «haré algo por ti mientras me correspondas haciendo algo por mí, pero haz algo turbio y tomaré represalias», siempre triunfa sobre otras variaciones, incluidas las más egoístas. Así pues, los análisis teóricos indican que una cooperación de este tipo, con condiciones, ayuda a la supervivencia[19]. Para los detractores, esto demuestra que la cooperación puede surgir orgánicamente y diseminarse por medio de la selección natural, sin necesidad de que los participantes compartan creencias religiosas.

Tras décadas de discusiones, algunos investigadores afirman ahora que las disputas han quedado por fin dirimidas. Pero como eso lo han asegurado defensores de los dos bandos, la evaluación del papel de la religión como un adhesivo social que promovió la supervivencia durante el Pleistoceno sigue eludiendo el consenso. Es un problema complejo. Al aunar, entre otras cualidades seductoras, el embrujo de las historias, la inclinación a dotar de voluntad a las entidades, los efectos reconfortantes de los rituales, el deseo de explicaciones, la seguridad de la comunidad y el atractivo cognitivo de ir en contra de lo esperado, la religión se alza como un desarrollo humano rico y complejo cuya génesis se remonta a tiempos tan lejanos que los datos fiables, desde las prácticas antiguas a los conflictos entre grupos, son escasos. El debate no se zanjará.

Otra posibilidad es que el razonamiento sobre la cohesión de grupo esté pasando por alto una parte esencial de la historia cuando evalúa el potencial adaptativo de la religión. Varios investigadores han sugerido que el impacto adaptativo de esta última se manifiesta de forma más directa en los propios individuos.

Adaptación individual y religión

Una de las propuestas que comentamos en nuestra indagación sobre el origen del lenguaje consideraba el papel del chismorreo como medio para mantener jerarquías y promover alianzas. Por frívola que hoy nos parezca esta forma de conversación, el psicólogo Jesse Bering sitúa el chisme en el meollo del papel adaptativo de la religión en el mundo antiguo. Antes de que adquiriésemos la capacidad de hablar, un granuja de nuestro grupo podía comportarse mal, ya fuera robando comida o parejas sexuales, ya fuera quedándose atrás en las

cacerías, pero si los testigos de la transgresión eran pocos y de baja condición en la jerarquía, el culpable podía salir impune. Con la llegada del lenguaje, eso cambió. Ahora bastaba una sola pero bien comentada infracción para que la reputación del culpable se resintiera y sus oportunidades de reproducirse se desplomasen. La sugerencia de Bering es que si un potencial transgresor imagina que siempre puede haber un testigo poderoso (cerniéndose en el viento, o en los árboles, o desde el cielo), será más reacio a transgredir, más reacio a ser pábulo de cotilleos importunos, más reacio a convertirse en un paria. Gracias a ello, tendrá una mayor probabilidad de tener descendencia y transmitir su instintivo temor de dios. La predisposición a la religión protege su linaje genético y de este modo se autoperpetúa[20].

Los indicios que apoyan esta proposición provienen de experimentos realizados por Bering en los que a unos niños se les plantea una tarea difícil y se los deja solos para que la resuelvan. Libres de supervisión, los investigadores encuentran lo que cualquiera esperaría: muchos niños hacen trampa. Si, en cambio, a algunos niños se les dice que hay un testigo invisible en la habitación, una presencia amable pero atenta, entonces siguen las reglas con mayor probabilidad. Este resultado se mantiene incluso en el caso de los niños que dicen no creer que en realidad haya un ser invisible. La conclusión de Bering es que la mente joven, que, según argumenta de forma plausible, nos ofrece una ventana más directa sobre nuestra inherente naturaleza humana en comparación con mentes de mayor edad, que ya han estado sujetas a una mayor influencia cultural, está más predispuesta a actuar como si una presencia invisible estuviese siempre atenta a lo que hacen. En tiempos remotos, era esta misma predisposición la que fomentaba el comportamiento prosocial que protegía reputaciones, incrementaba las oportunidades de reproducirse y, por consiguiente, difundía todavía más la propia predisposición, que no es otra que la predisposición a una sensibilidad religiosa.

Algunos psicólogos sociales experimentales que llevan décadas desplegando la perspectiva de Ernest Becker, cuya obra *La negación de la muerte* nos encaminó en el capítulo 1, consideran un papel adaptativo distinto para la religión. A juicio de estos investigadores, el terror de saber que vamos a morir «habría convertido a nuestros ancestros en temblorosos montones de protoplasma biológico destinados al olvido»[21]. Y sugieren que nos podría haber salvado la promesa de una vida más allá de la muerte física, sea literal o simbólica. El propio Becker defendió de manera convincente que afrontar la conciencia de la mortalidad invocando lo sobrenatural fue una sublime

innovación humana. Para aliviar el trastorno del traspaso se necesita un paliativo incondicional e ilimitado, algo imposible de alcanzar en el mundo real de las cosas materiales.

Cierto es que cuesta imaginar a nuestros robustos antepasados abrazados en medio de la sabana en un estado de parálisis inducida por la ansiedad. Pero por medio de ingeniosos experimentos psicosociales, los investigadores han podido argumentar que incluso en nuestro mundo moderno nos sentimos demostrablemente afectados por la conciencia de la mortalidad, aunque no lo percibamos así. En uno de estos experimentos, se pidió a unos jueces de Arizona que propusiesen la multa que merecían los acusados de cierta falta. En las instrucciones escritas que se trasladó a los jueces, que incluían un cuestionario estándar de personalidad, se incluía para la mitad de ellos un par de preguntas adicionales que los obligaban a reflexionar sobre su propia mortalidad (por ejemplo, ¿qué emociones le produce pensar sobre su propia muerte?). Los investigadores esperaban que, como el código penal forma parte del esfuerzo concertado de la sociedad por afirmar el control sobre una realidad por lo demás anárquica, alzándose como baluarte frente a los peligros que acechan tras las fronteras de la civilización, los jueces a los que se había recordado el peligro último, que es su propio deceso, aplicarían con más fuerza los estatutos legales. Las predicciones fueron correctas. Pero incluso a los investigadores les pareció notable la disparidad de las multas recomendadas por los dos grupos de jueces. Por término medio, las sanciones aplicadas por los magistrados a los que se les había recordado su mortalidad fueron nueve veces superiores a las del grupo de control[22].

Tal como recalcan los propios investigadores, si unas mentes de jueces, diligentemente entrenadas e imbuidas en los estándares de la justicia desapasionada, pueden verse tan afectadas solo con que se les recuerde su propia mortalidad, deberíamos pensar dos veces antes de descartar una influencia parecida pero igualmente sigilosa en cada uno de nosotros. De hecho, cientos de estudios posteriores (cambiando los sujetos, los países de origen, las tareas encomendadas, la forma de estimular la conciencia de la mortalidad, etc.) han demostrado que esas influencias pueden detectarse y manifestarse ampliamente, desde las votaciones hasta los prejuicios xenófobos, la expresión creativa o la afiliación religiosa[23]. Becker mantenía la idea, que estos estudios respaldan, de que la cultura ha evolucionado en parte para mitigar los efectos potencialmente debilitantes que de otro modo acompañan a la conciencia de la mortalidad. En consecuencia, desde esta

perspectiva, si uno desdeña esa posibilidad es precisamente porque la cultura está haciendo su trabajo.

Pascal Boyer, con quien iniciamos nuestra discusión sobre las raíces evolutivas de la religión, rechaza para ella este papel, argumentando que «a menudo un mundo religioso es tan aterrador como un mundo sin presencia sobrenatural, y muchas religiones no producen tanto un estado de sosiego como una gruesa cortina de pesadumbre»[24]. Pero en lugar de proteger un convulso saco de huesos, en el espíritu de los adeptos a Becker, y lejos de proyectar negras sombras sobre sus devotos seguidores, como imagina Boyer, una sensibilidad religiosa podría haber proporcionado un beneficio más modesto para un paciente menos desalentado. Tal vez las antiguas actividades religiosas iluminasen la muerte con una luz más suave y situasen la experiencia cotidiana dentro de una narración más perdurable, una consecuencia beneficiosa de la experiencia religiosa que William James describió como «promesa de amparo y temple de paz» que al mismo tiempo instila «un nuevo entusiasmo que, como un don para la vida, toma la forma de embrujo lírico o de llamamiento a la responsabilidad y el heroísmo»[25].

Resulta evidente que todavía no se ha alcanzado un consenso sobre el origen de la religión y su tenaz persistencia. Y no por falta de ideas: como nueva atribución de un cerebro que es fruto de la selección natural, como impulsora de la cohesión de grupo, como calmante de la ansiedad existencial, como protectora de reputaciones y oportunidades de reproducción. El registro histórico quizá sea demasiado fragmentario como para que lleguemos nunca a dirimir el caso; la religión podría desempeñar papeles demasiado variados como para doblegarse a explicaciones generales. Sigo inclinándome por la relevancia de la religión para nuestro singular reconocimiento de una vida finita; en la concisa expresión de Stephen Jay Gould: «Un cerebro grande nos permitió aprender […] lo inevitable de nuestra propia mortalidad»[26] y «Toda religión comenzó con la conciencia de la muerte»[27]. Que luego la religión se afianzase porque transformó esa conciencia en una ventaja adaptativa ya es harina de otro costal.

El exquisito orden del cerebro le permite generar copiosos pensamientos y acciones, algunos directamente vinculados a la supervivencia, otros no. Es realmente esta capacidad, nuestro amplísimo repertorio de comportamientos, lo que sienta los cimientos de la variedad de libertad humana que discutimos en el capítulo 5. Y no cabe duda que a través de estas acciones hemos mantenido la religión firmemente entre nosotros, desarrollándola a lo largo de

miles de años en instituciones cuya influencia se deja sentir en todo el planeta.

Un bosquejo de las raíces religiosas

Durante el primer milenio a. C., en la India, China y Judea, algunos pensadores tenaces e inventivos reexaminaron los mitos y formas de ser de los antiguos, y de sus esfuerzos germinaron, entre otras cosas, lo que el filósofo Karl Jaspers describió como los «principios de las religiones del mundo que aún hoy siguen los seres humanos»[28]. Los estudiosos debaten el grado de relación entre estos procesos tan alejados, pero están de acuerdo en el resultado. Los sistemas religiosos se tornaron cada vez más organizados al tiempo que sus seguidores elaboraban relatos, recogían saberes y compendiaban directrices que, primero canalizados a través de profetas ungidos y después transmitidos oralmente de generación en generación, se ganaron el sello de lo sacro. Por supuesto, existen grandes diferencias en el contenido de los textos resultantes, pero guardan en común la fascinación por las preguntas que guían nuestra exploración en estas mismas páginas: ¿de dónde venimos? ¿Adónde vamos?

Entre los registros escritos más antiguos que han llegado hasta nosotros se encuentran los Vedas. Compuestos en sánscrito en el subcontinente indio, algunas de sus partes se remontan a 1500 a. C.; junto a los Upanishads, un rico corpus de glosas probablemente escrito después del siglo VIII a. C., los Vedas conforman la voluminosa colección de versos, mantras y prosa que constituye los textos sagrados de la religión hindú, hoy practicada por uno de cada siete habitantes de la Tierra, unos 1100 millones de personas. Antes de cumplir los siete años, tuve una experiencia personal con estas obras.

Fue a finales de la década de 1960. Paz, amor y Vietnam flotaban en el aire el soleado día en que mi padre, mi hermana y yo salimos a dar un paseo por Central Park. Nos paramos junto al Naumburg Bandshell, a pocos pasos del paseo de los Poetas, donde una gran congregación de devotos del Hare Krishna tocaba tambores, cantaban y danzaban enérgicamente. Uno de los seguidores, con los ojos hinchados por las lágrimas, expresaba su apasionada comunión astral tamborileando rítmicamente mientras miraba atentamente el sol. Para mi sorpresa, me di cuenta de repente de que uno de los que tocaban

los tambores, ataviado con ropajes sueltos y con la cabeza completamente afeitada salvo por un mechón en lo alto, era mi hermano. Creía que estaba en la universidad. Al parecer, el paseo había sido la forma elegida por mi padre para darnos a conocer el nuevo rumbo que había tomado la vida de nuestro hermano.

En las décadas siguientes, la comunicación con mi hermano fue episódica, pero en cada encuentro los Vedas ocuparon un lugar central, o casi central. Me resulta difícil decir si mis propios intereses fueron de algún modo desencadenados por aquellos encuentros o si las conversaciones surgieron de manera natural entre dos hermanos que abordaban las mismas preguntas desde perspectivas muy dispares. Sin duda fue enriquecedor aprender sobre reflexiones antiguas, y para mí desconocidas, sobre los orígenes del cosmos:

> No existía entonces ni el ser ni el no ser; no existía la esfera del espacio, con su bóveda celeste. ¿Qué se movía? ¿Dónde? ¿Quién lo protegía? ¿Dónde estaba el mar insondable? Entonces no existía la muerte, ni lo inmortal. Ninguna señal que distinguiera la noche del día. Solo el uno respiraba, sin aliento, por impulso propio. Aparte de eso, no existía nada[29].

Me conmovió la universalidad de la necesidad humana de sentir los ritmos de la realidad. Pero para mi hermano, los Vedas eran más que eso. Le ofrecían una visión más amplia de la cosmología que yo estudiaba matemáticamente. Como poesía, sus palabras captan con ingenio el enigma del principio del principio. Como metáfora, nos hablan de la naturaleza desconcertante del tiempo antes del tiempo. Como meditación, quizá en forma de una inmersión en compañía de otros en torno a una hoguera, envueltos por la asombrosa pero enigmática bóveda del firmamento, negra como la tinta pero poblada de estrellas, los poemas transmiten la aparente paradoja de que exista siquiera un universo. Pero los himnos y versos antiguos, los relatos imaginativos sobre los Purusha de mil cabezas desmembrados para crear el Sol, la Tierra y la Luna y tantas otras historias elevadas y evocadoras, no explican el origen del universo. Las palabras son el reflejo de cómo nuestras mentes, siempre en busca de pautas, siempre deseosas de explicaciones, siempre atentas a la supervivencia, fabrican un relato vívido que sirve de marco simbólico para vivir: cómo llegamos a ser, cómo debemos comportarnos, qué consecuencias tienen nuestras acciones, cuál es la naturaleza de la vida y la muerte. Lo que aquellos esporádicos roces fraternales me hicieron ver con claridad es que los

Vedas buscan algo estable, algún tipo de cualidad constante bajo las arenas movedizas de la realidad que conocemos. Es una descripción que yo, y muchos de mis colegas, usaríamos con gusto para caracterizar la misión de la física fundamental. Las dos disciplinas comparten el anhelo por ver más allá de las apariencias propias de la experiencia cotidiana. Pero las explicaciones que cada una cree que permiten realizan esa misión son de naturaleza completamente distinta.

A mediados del siglo XI a. C., Siddhārtha Gautama, un príncipe nacido en el actual Nepal que creció estudiando los Vedas, comenzó a sentirse consternado al confrontar la vida de lujos que había recibido con la angustia que soportaban aquellos que llevaban una existencia más común. Tal como explica la famosa historia, Gautama decidió renunciar a sus privilegios para errar por el mundo en busca de una forma de aliviar la miseria del sufrimiento humano. El conocimiento que obtuvo de aquella experiencia, desarrollado y promulgado por sus seguidores sobre todo después de su muerte, conformaron el budismo, una religión que hoy practican uno de cada doce habitantes de nuestro planeta, más o menos quinientos millones de personas. A medida que el pensamiento budista se fue diseminando, surgieron numerosas sectas, pero todas ellas comparten la creencia en que la percepción es una guía ilusoria de la realidad. Hay cualidades del mundo que pueden parecer estables cuando, en realidad, todo cambia constantemente. Desviándose de sus orígenes védicos, el budismo niega que un sustrato inmutable subyazga a la existencia y atribuye las raíces del sufrimiento humano a la falta de reconocimiento de la impermanencia de todo. Las enseñanzas de Buda dibujan un modo de vida que promete una visión de la verdad sin adornos, percibida con mayor claridad, y, como en los Vedas, el sendero que conduce a esa iluminación implica una serie de renacimientos que buscan concluir los ciclos de reencarnación al alcanzar un estado eterno de felicidad libre de deseos, libre de sufrimiento y libre del propio yo. Si los anteriores imaginarios de la humanidad acerca de las esferas donde continuaba la vida después de esta vida ya constituían una notable maniobra para afrontar el enigma de la mortalidad, las posiciones hindú y budista son todavía más notables. La muerte es vista como un nuevo principio en un proceso cíclico que tiene como meta la liberación última y permanente respecto a la propia vida. La conclusión de los ciclos, una vez alcanzada, conduce a un dominio donde el concepto mismo de existencia individual desaparece. Nuestra impermanencia deviene un rito de paso sagrado de camino a lo atemporal.

Como hinduismo y budismo buscan una realidad más allá de las ilusiones de la percepción cotidiana, que es una característica que también se aplica a muchos de los avances científicos más sorprendentes de los últimos cien años, ha nacido una pequeña industria que se dedica a producir artículos, libros y películas que pretenden establecer vínculos con la física moderna. Aunque se pueden encontrar semejanzas en perspectiva y lenguaje, nunca he hallado más que una resonancia metafórica entre ideas distintas laxamente interpretadas. Las descripciones de la física moderna que se presentan en la divulgación, la mía y la de otros, suelen excluir la matemática en beneficio de una explicación más accesible, pero es en la matemática, de manera inequívoca, donde se afianza la ciencia. Las palabras, por bien escogidas y usadas que estén, no pasan de ser una traducción de las ecuaciones. Apelar a esas traducciones para establecer nexos con otras disciplinas nunca pasará de ser una alianza poética.

Este pronunciamiento es acorde con al menos algunas de las voces más destacadas de las disciplinas espirituales. Hace algunos años fui invitado a participar en un foro público con el dalái lama. Durante la discusión, señalé la preponderancia de libros que explicaban de qué modo la física moderna recapitula descubrimientos que ya se habían realizado en el Lejano Oriente hace miles de años, y le pregunté al dalái lama si estas aserciones le parecían acertadas. Su respuesta franca y directa dejó en mí una honda impresión:

> En lo que atañe a la conciencia, el budismo tiene algo importante que decir. Pero en lo que atañe a la realidad material, necesitamos dirigirnos a usted y a sus colegas. Son ustedes quienes penetran en esas honduras[30].

Recuerdo haber pensado lo fantástico que sería que los líderes religiosos y espirituales de todo el mundo siguieran este ejemplo sencillo, valiente y honesto.

Más o menos por la misma época en que Buda erraba por la India, el pueblo judío del reino de Judea era derrotado por los babilonios y forzado al exilio. En sus esfuerzos por forjar su identidad, los líderes judíos recogieron narraciones escritas dispares, supervisaron la transcripción de relatos orales y produjeron con todo ello las primeras versiones de la Biblia hebrea, un documento que seguiría evolucionando hasta convertirse en el texto sagrado de las religiones abrahámicas que hoy practican más de uno de cada dos habitantes de la Tierra, unos cuatro mil millones de personas[31]. El dios del

judaísmo, el cristianismo y el islam es el creador de todas las cosas, el dios uno, omnipotente, omnisciente y omnipresente que para muchos, y en todo el mundo, invocan mentalmente cuando, en contextos seculares o sacros, se habla de religión.

El Antiguo Testamento nos cuenta su propia historia del origen, bien conocida por todos. Salvo que en realidad explica dos historias. La primera ocupa seis días, comienza con la formación del cielo y la tierra y concluye con la creación del hombre y la mujer; la segunda ocupa un solo día, al principio del cual es creado el hombre, y, durante su primera siesta, entra en escena la mujer. Se siguen de inmediato generaciones y generaciones, pero el Antiguo Testamento no es muy franco acerca de adónde van los protagonistas tras su muerte. Salvo por un par de breves referencias a la resurrección, no se compromete con una vida después de la muerte. Los místicos y exégetas judíos desarrollaron después numerosas ideas acerca de almas inmortales a la espera de otro mundo, pero no hay una única interpretación que reconcilie la infinidad de fuentes y comentarios. Esa incertidumbre se desvanecería medio milenio más tarde, cuando el cristianismo desarrolló una doctrina teológica acerca de almas eternas que mantienen sus identidades más allá de su tiempo en la tierra. Medio milenio después, el islam introduciría su propio y extenso corpus de creencias para abordar cuestiones parecidas, alineándose con el cristianismo en su reverencia hacia la llegada de un día del juicio en el que los muertos se alzarán y quienes sean considerados dignos recibirán una eterna recompensa celestial, y el resto, la condenación eterna.

El puñado de religiones que hemos contemplado brevemente son seguidas en conjunto por más de tres de cada cuatro habitantes del planeta Tierra. Con miles de millones de fieles, la naturaleza y formas de compromiso religioso varían de manera considerable y, si incluimos las más de cuatro mil religiones menores que se practican en la actualidad en todo el mundo, el abanico de compromisos y los detalles del contenido doctrinal se amplían todavía más. Pese a ello, hay cualidades comunes, como el reconocimiento de personajes exaltados que han visto más lejos o han tenido acceso a relatos que supuestamente explican cómo comenzó todo, cómo acabará, adónde iremos y cuál es la mejor manera de llegar allí. Profundizando aún más, prevalece en común la expectativa de que los seguidores asumirán cierto marco mental sagrado. El mundo está lleno de historias que pueden influir en la manera en que conducimos nuestras vidas, repleto de pronunciamientos que nos indican cómo debemos comportarnos. Las narraciones y mandatos que quedan

recogidos en doctrinas religiosas se elevan por encima del resto porque en la mente de los fieles suscitan algún tipo de «creencia».

El anhelo de creer

Hace algunos años, mientras me encontraba en los últimos y caóticos días de un absorbente proyecto, recibí una invitación para pronunciar una conferencia plenaria en un encuentro que había de celebrarse en el estado de Washington. Distraído, acepté la propuesta sin informarme adecuadamente sobre la organización. Unos meses más tarde, cerca ya del día de la conferencia, me di cuenta de que había sido invitado para hablar en la Escuela de la Iluminación de Ramtha, una organización dirigida por Judy Zebra Knight, que dice servir de canal para un guerrero de hace treinta y cinco mil años, Ramtha, de las tierras de Lemuria (que, al parecer, solía estar en guerra con la desaparecida Atlántida). Una búsqueda rápida me llevó hasta unos reveladores videoclips, entre ellos un antiguo episodio de «The Merv Griffin Show» en el que Knight echa atrás la cabeza, la sacude hacia delante, se sumerge en un trance, baja la voz, adopta una forma de hablar a medio camino entre Yoda y la reina de Inglaterra, y, según nos quiere hacer creer, encarna al sabio lemuriano. Mi hija pequeña, que miraba por encima de mi hombro, intentó en vano contener la risa. Yo también me habría reído de no ser porque me mortificaba el hecho de haber aceptado la invitación. Pero era el día antes de la presentación, demasiado tarde como para escabullirme con elegancia.

A mi llegada, me encontré con cientos de personas con los ojos vendados y los brazos extendidos que daban vueltas por un extenso campo. Mi guía me explicó que cada uno de ellos llevaba prendida una tarjeta en la que había escrito el sueño de su vida, y el ejercicio consistía en «sentir» su camino hacia una tarjeta idéntica plantada en algún lugar de aquel campo. Me comentó que el éxito era un paso clave para la consecución del sueño. «¿Y cómo le está yendo?», le pregunté. «Oh, estupendamente. En esta sesión ya hay una participante que ha encontrado su carta». Un poco más arriba había unos arqueros con los ojos vendados. Me mantuve a una distancia segura y eludí como pude los ruegos para que participara, sobre todo cuando me di cuenta de que se había unido un fotógrafo a nuestro grupo. Los arqueros con los ojos vendados tuvieron tanto éxito como los buscadores con los ojos vendados.

Por último, se unió a nosotros una joven de unos veinte o treinta y tantos años, cuyo talento para la telepatía le permitía decir qué cartas aparecían sucesivamente de una baraja bien mezclada. «Siete de diamantes —predecía—. Maldita sea, seis de bastos. Pero solo me he equivocado por uno. Nueve de espadas. Oh, vaya, un tres de diamantes. ¡Ajá!, ahí está el diamante». Y así una carta tras otra. Me explicó que practicaba muchas horas al día, pero que sabía que aún le faltaba mucho entrenamiento.

A quienes se agregaron a nuestro grupo, y más tarde a todos durante la conferencia, no pude evitar la tentación de hacerles unas observaciones básicas, muchas de las cuales ya hemos comentado en estas páginas. Expliqué que somos una especie que, cuando mira el mundo, encuentra pautas. Y que, por lo general, eso es bueno. A lo largo de muchas generaciones, la selección natural nos ha equipado para identificar pautas en el aspecto y la manera de moverse de personas y objetos, y eso nos permite identificarlos con rapidez con unas pocas pistas visuales. Detectamos pautas en el comportamiento animal que nos permiten predecir cuándo es seguro acercarse y cuándo es mejor cambiar de dirección. Vemos pautas en la forma en que los objetos, desde las rocas hasta las lanzas, vuelan después de ser lanzados, una habilidad que debió ser especialmente útil para nuestros ancestros a la hora de buscar alimento. Es a través de las pautas como desarrollamos los medios para comunicarnos y, de este modo, unirnos en grupos, de tribus a naciones, que ejercen las más poderosas influencias sobre el mundo. En suma, la capacidad para reconocer pautas es lo que nos permite sobrevivir. Sin embargo, proseguí, a veces nos pasamos de frenada. A veces los detectores de pautas fruto de la selección natural están tan preparados y predispuestos a declarar la detección de una señal que vemos pautas e imaginamos correlaciones donde no las hay. A veces atribuimos significado a aquello que no lo tiene. Gracias a las matemáticas más básicas, sabemos que, por término medio, una de cuatro veces acertaremos el palo de una carta; una de cada trece veces, el número. Pero esta pauta no revela nada sobre nuestras habilidades telepáticas. De Pascuas a Ramos (bueno, mucho menos a menudo que eso) caminaremos al azar por un campo y encontraremos esa carta que es igual a la nuestra, pero eso no nos dice nada sobre si se cumplirán o no nuestros sueños. ¿Con qué frecuencia, les pregunté, nos damos cuenta de que una notable coincidencia «no» se ha producido?

Los asistentes, que para entonces estaban congregados en un cavernoso granero, asentían con entusiasmo. Muchos se levantaron para aplaudir, lo cual, me apresuré a explicar a aquel público, era de agradecer, pero me

confundía. Lo que les estaba explicando era que su manera de encontrar una realidad más profunda y los métodos que practicaban no iban a llevarlos a ningún lado. Otra ovación.

Más tarde, durante la sesión de firmas de libros, varios participantes me lo aclararon *sottovoce* : «Muchos de nosotros no creemos en muchas de las cosas que hacemos aquí, y es importante que alguien lo diga de viva voz. Pero ahí fuera «hay algo», podemos sentirlo, y si venimos a la escuela es porque necesitamos estar en compañía de otras personas que sienten el mismo anhelo por buscar una verdad más profunda». Puedo entenderlo. Puedo entender el anhelo. La historia de la física es una colección de episodios en los que una y otra vez unas heroicas exploraciones matemáticas han revelado que «hay algo más» ahí fuera, a menudo algo extraño y asombroso que nos obliga a rehacer nuestra visión de la realidad. Tenemos todas las razones para pensar que nuestro conocimiento actual, pese a su capacidad para explicar una ingente cantidad de datos con extraordinaria precisión, es provisional, y los físicos esperamos que, para avanzar, se sigan produciendo revisiones. Sin embargo, hemos perfeccionado durante siglos nuestras herramientas de investigación, y son esos métodos matemáticos y experimentales los que constituyen el riguroso corpus de la práctica científica. Son los métodos que transmitimos a nuestros estudiantes y colegas investigadores. Son los métodos que han demostrado su capacidad para acceder de manera fiable a cualidades ocultas de la realidad.

Estoy abierto a proposiciones poco convencionales. Si unos datos recogidos en experimentos cuidadosamente diseñados y replicables con el objeto de investigar, pongamos por caso, la capacidad de sentir cartas ocultas en una baraja, revelasen una tasa de éxito superior a la esperada al azar, o si unos datos robustos estableciesen que un miembro de nuestra especie puede servir de canal para un antiguo sabio de una tierra perdida, estaría interesado. Extraordinariamente interesado. Pero a falta de evidencias, a falta de una sola razón para esperar que esos datos puedan producirse, a falta de argumentos que expliquen por qué esas afirmaciones no contradicen de manera frontal todo lo que se ha demostrado sobre cómo funciona la realidad, no tardamos en llegar a la conclusión de que no hay base para creer en esas proposiciones.

Y eso plantea una pregunta: ¿hay alguna razón para creer en un ser invisible y todopoderoso que construyó el universo, que escucha y responde a nuestras plegarias, que está pendiente de lo que hacemos y decimos, y que reparte premios y castigos? Antes de elaborar una respuesta, conviene que desarrollemos más a fondo el concepto de creencia.

Creencia, confianza y valor

Casi todos los que me preguntan si creo en Dios usan «creencia» del mismo modo que si me preguntasen si creo en la mecánica cuántica. De hecho, a menudo me hacen las dos preguntas de manera consecutiva. Yo tiendo a expresar mi respuesta en términos de confianza (una medida de incertidumbre), y explico que mi confianza en la mecánica cuántica es alta porque la teoría predice con gran exactitud diversas características del mundo, como el momento de dipolo magnético del electrón, con una precisión superior a nueve decimales, mientras que mi confianza en la existencia de Dios es baja a causa de la pobreza de datos rigurosos que la apoyen. La confianza, como estos ejemplos demuestran, surge de un juicio desapasionado y esencialmente algorítmico de los indicios empíricos.

De hecho, cuando los físicos analizan datos y anuncian un resultado, cuantifican su confianza mediante procedimientos matemáticos bien establecidos. La palabra «descubrimiento» suele usarse únicamente cuando la confianza cruza un umbral matemático: la probabilidad de equivocarse por culpa de una chiripa estadística en los datos debe ser menos de alrededor de 1 entre 3,5 millones (un número que puede parecer arbitrario, pero que surge de forma natural en los análisis estadísticos). Por supuesto, incluso unos niveles de confianza tan elevados no garantizan que el «descubrimiento» sea verdadero. Datos de experimentos posteriores pueden obligarnos a revisar nuestra confianza; también en ese caso, la matemática proporciona un algoritmo para calcular la actualización.

Aunque nadie en su sano juicio sigue métodos matemáticos para vivir, muchas de nuestras creencias las alcanzamos a través de razonamientos parecidos, pero que no son en apariencia tan analíticos. Vemos a Jack con Jill y nos preguntamos si son pareja; volvemos a verlos juntos una y otra vez, y crece la confianza que depositamos en nuestra conclusión. Más tarde nos enteramos de que Jack y Jill son hermanos, así que restamos confianza a nuestra anterior evaluación. Y así sucesivamente. Es un proceso iterativo que uno espera que converja en unas creencias que reflejen la verdadera naturaleza del mundo. Pero no tiene por qué ser así. La evolución no ha configurado nuestros procesos cerebrales para formar creencias que concuerden con la realidad, sino para favorecer las que generan comportamientos que promuevan la supervivencia. Y las dos consideraciones

no tienen por qué coincidir. Si nuestros antepasados hubiesen investigado a fondo cada roce y cada crujido que llamase su atención, habrían descubierto que la mayoría de ellos se podían explicar sin necesidad de apelar a un agente volitivo. Pero desde el punto de vista de la eficacia biológica adaptativa, su onerosa inversión en la búsqueda de la verdad les habría reportado pocas ventajas. A lo largo de miles de generaciones, nuestro cerebro renunció a la exactitud en bien de un conocimiento más rápido y pragmático. Las respuestas ágiles suelen batir a las evaluaciones consideradas. La veracidad es un personaje importante en el drama de la creencia, pero en escena queda fácilmente eclipsado por la supervivencia y la reproducción.

Para acabar de enredar la trama, la evolución añadió un nuevo personaje: las emociones. En 1872, más de doce años después de anunciar la evolución por medio de la selección natural, Darwin publicó *La expresión de las emociones en el hombre y en los animales*, una obra en la que exploraba su convicción de que el principal motor de la expresión de las emociones no es la cultura, sino un cerebro biológicamente adaptado. Basándose en observaciones meticulosas de sus propios hijos, de cuestionarios muy divulgados y de datos sobre diversas culturas que había recopilado durante sus largas expediciones, Darwin argumentó, por ejemplo, que la tendencia a sonreír cuando nos sentimos bien o a sonrojarnos cuando nos sentimos abochornados es universal. Podemos esperar esas mismas respuestas en cualquier cultura del mundo. En el siglo y medio que ha transcurrido desde entonces, los investigadores han seguido la dirección señalada por Darwin y han buscado los papeles adaptativos que pueden explicar las diversas emociones, además de investigar los sistemas neuronales responsables de generarlos. El miedo, según nos han revelado estas investigaciones, es verdaderamente primario: las respuestas comportamentales y fisiológicas rápidas ante el peligro han tenido desde siempre un claro valor adaptativo. Es probable que el amor parental, que nos mueve a proporcionar cuidados esenciales a una progenie desvalida, sea también una adaptación antigua. El bochorno, la culpa y la vergüenza, que son especialmente relevantes como comportamientos facilitadores en grupos de gran tamaño, son adaptaciones que puede que llegasen más tarde, a medida que aumentaba el tamaño de los grupos[32]. Lo relevante para lo que nos ocupa ahora es que del mismo modo que la presión adaptativa modeló una mente humana poseedora de lenguaje, contadora de historias, hacedora de mitos, practicante de rituales, creadora de arte y buscadora del saber, esta modeló también nuestras ricas capacidades emocionales. La emoción se ha ido urdiendo a lo largo de todo nuestro

desarrollo evolutivo. Así, las creencias han surgido de un complejo cálculo de síntesis entre análisis razonados y respuestas emocionales dentro de una mente que adquiría un talento para la supervivencia[33].

Nuestro cálculo de la creencia también depende de una multitud de factores, entre los cuales hay influencias sociales, fuerzas políticas y simples conveniencias. En los primeros años de vida, las creencias están fuertemente sesgadas por la autoridad parental. ¿Mamá o papá dicen que es cierto? Pues debe serlo. Tal como ha observado Richard Dawkins, la selección natural favorece a los progenitores que transmiten a sus hijos información que aumenta la supervivencia, así que confiar en lo que dicen mamá o papá tiene sentido desde una perspectiva evolutiva. Más adelante, muchos inician su propio cálculo de creencias, investigando, discutiendo, leyendo, desafiando ideas, y también este cálculo suele estar sesgado por expectativas previas y por la exposición a las creencias de otros. La mayoría de nosotros también ampliamos la lista de autoridades que nos parecen fiables para incluir en ella profesores, líderes, amigos, dirigentes, o cualquiera que veamos como experto. Tenemos que hacerlo. Nadie puede redescubrir, o siquiera verificar, miles de años de conocimiento acumulado. En cierta ocasión tuve un sueño, o más bien una pesadilla, en el que volvía a encontrarme en la defensa de mi tesis doctoral, y un miembro del tribunal, sonriéndose por lo bajo, me decía que todos los experimentos y observaciones en los que se basaban las «leyes» físicas de la mecánica cuántica estaban amañados. Había sido víctima de una sofisticada broma, engañado por un panteón de autoridades que respetaba y una comunidad de colegas académicos en los que confiaba. Por improbable que parezca la escena del sueño, lo cierto es que solo he verificado personalmente una fracción muy pequeña de los experimentos esenciales de la disciplina. Puede decirse que mi aceptación de la mayoría de los resultados es un acto de fe.

Mi confianza es el producto de décadas de experiencia de primera mano, de ser testigo del empeño con que los físicos minimizan la subjetividad recogiendo datos con suma meticulosidad, cuestionando constantemente las hipótesis, descartando todas salvo aquellas que satisfacen un conjunto de rigurosos estándares universales. Pero incluso con tan diligente atención, la contingencia histórica y los sesgos humanos influidos por las emociones encuentran la forma de colarse. Una de las aproximaciones predominantes a la mecánica cuántica (la llamada «interpretación de Copenhague») se remonta a unas pocas personalidades poderosas que en los comienzos de la teoría llevaban las riendas. Para una discusión detallada, refiero al lector a uno de

mis otros libros, *La realidad oculta*, pero en definitiva sospecho que si la mecánica cuántica la hubiese desarrollado un conjunto distinto de personalidades, la ciencia formal seguiría existiendo tal como la conocemos hoy, pero esta particular perspectiva interpretativa no habría gozado de la misma posición dominante que ha ocupado durante tantas décadas. La belleza de la ciencia es que, por medio de la investigación continuada, las doctrinas de una época son repensadas a fondo en la siguiente, acercándolas cada vez más a una verdad objetiva. Pero incluso en una disciplina diseñada para la objetividad, eso requiere un proceso. Y un proceso lleva tiempo.

No debería sorprendernos entonces que en el ámbito caótico, desordenado y emocionalmente cargado de nuestras cotidianas andanzas el abanico de creencias sea amplio e imaginativo, y en ocasiones confuso y frustrante. A la hora de formar sus creencias, algunos se dirigen a la ciencia, tanto por contenido como por estrategia. Otros se fían más de alguna autoridad, otros de la comunidad. Algunos son coaccionados, unas veces de forma sutil, otras abiertamente. Hay quienes depositan toda su confianza en la tradición. Y aún otros dan plena jurisdicción a la intuición. Y en los centros de procesamiento de la mente, subterráneos y por lo general inconscientes, todos empleamos una combinación idiosincrásica y altamente variable de todas esas tácticas. Y lo que es más, no hay nada que nos impida mantener creencias incompatibles o emprender acciones que sugieren que lo hacemos. No me cuesta admitir que de vez en cuando toco madera o hablo con los difuntos o busco algún tipo de apoyo celestial. Nada de eso cuadra con mis creencias racionales sobre el mundo, pero mis ocasionales inclinaciones apotropaicas no me molestan en absoluto. De hecho, hay cierta complacencia en la ocasional transgresión de la austeridad de lo racional.

A los filósofos profesionales los pagan por escudriñar las creencias para revelar presuposiciones ocultas o llamar la atención sobre inferencias infundadas, pero es obvio que no es así como actuamos nosotros en la actualidad, ni nuestros antepasados en su tiempo. La mayoría de las creencias de nuestra vida nunca las sometemos a examen. Quizá también eso sea una forma de adaptación, pues quienes se quedan absortos mirándose el ombligo tienden a pasar por alto que se les acaba la comida o que una tarántula se acerca con sigilo. Y eso significa que en el momento de evaluar si este o el otro creen en esto o en aquello, concebir las creencias como si hubiesen surgido de una intensa reflexión y un meticuloso examen suele ser un error garrafal. Tal como dice Boyer: «Suponemos que las ideas de agentes sobrenaturales […] se presentan a la mente y que algún proceso de toma de

decisiones las acepta como válidas o las rechaza». Pero como estas ideas tocan un gran número de centros de inferencia del cerebro, de la detección de voluntades a la teoría de la mente o el seguimiento de relaciones, y como la selección natural ha dotado esos centros de la capacidad de realizar sus propios diagnósticos por debajo de nuestro nivel de conciencia, el modelo del juez y jurado racionales «podría ser una concepción bastante distorsionada de cómo se adquieren y representan esos conceptos»[34].

Además, las propias cosas a las que tiene sentido aplicar el concepto de creencia cambian de una época a la siguiente. Tal como observa Karen Armstrong, quienes realizaban los ritos de los antiguos misterios eleusinos «se habrían mostrado perplejos ante la pregunta de si creen que Perséfone realmente descendió a la tierra tal como describe el mito»[35]. Sería como si alguien nos preguntase si creemos en el invierno. «¿Creer en el invierno?», replicaríamos, con toda la razón. «Las estaciones… simplemente son». De igual modo, según imagina Armstrong, nuestros antepasados habrían asimilado los viajes de Perséfone «porque, mirasen donde mirasen, veían que la vida y la muerte eran inseparables, y que la tierra moría y regresaba de nuevo a la vida. La muerte era temible, aterradora, inevitable, pero no era el fin. Si cortaban una planta y tiraban la rama muerta, aparecía un brote nuevo»[36]. El mito no clamaba por ser creído. No suscitaba crisis de fe que los creyentes resolviesen tras dolorosas deliberaciones. El mito proporcionaba un esquema poético, un marco mental metafórico, que se tornaba inseparable de la realidad que iluminaba.

Tal vez se pueda establecer también una analogía con lo que ocurre durante el desarrollo a largo plazo del lenguaje natural[37]. En su afán por la expresión creativa y el énfasis, los hablantes salpican sus frases de metáforas. Yo mismo acabo de hacerlo, y el lector apenas lo habrá notado. Salpicamos con sal los estofados, o con azúcar los dulces. Pero mi uso de «salpicar» es una metáfora tan banal que raro será el lector en quien invoque la imagen de una mano esparciendo suavemente las palabras sobre un festín de frases recién cocidas. Con el tiempo, las metáforas quedan tan gastadas que toda cualidad poética que pudieran tener al principio se evapora (el agua se evapora, la poesía no) y se convierten en unos peones más de la lengua (un trabajador es un peón, una palabra no). En suma, adquieren un nuevo sentido literal. Y tal vez ocurra algo parecido con las nociones mítico-religiosas, que quizá comiencen su andadura como formas evocadoras, poéticas o metafóricas de ver el mundo y, poco a poco, con el paso del tiempo, van

perdiendo su poesía, se despojan de su significado metafórico y completan su transición al literalismo.

Lo más que yo me acerco a ese literalismo es en reconocer que pueda existir algún dios. Reconozco que es una posibilidad que no se puede descartar. En la medida que la supuesta influencia de un dios no modifique en modo alguno la progresión de la realidad que tan bien describen las leyes matemáticas, ese dios será compatible con todo lo que observamos. Pero se abre un inmenso abismo entre la mera compatibilidad y la necesidad explicativa. Apelamos a las ecuaciones de Einstein y Schrödinger, al marco evolutivo de Darwin y Wallace, a la doble hélice de Watson y Crick, y a una larga lista de logros científicos no porque sean compatibles con nuestras observaciones, que por supuesto lo son, sino porque proporcionan una estructura explicativa poderosa, detallada y predictiva con la que entender nuestras observaciones. Bajo esta medida, las doctrinas religiosas ni aparecen en la escala, aunque naturalmente a muchos fieles esta medida les parecerá irrelevante. El problema es que una perspectiva literal impide evaluarlas de ese modo. Un enunciado religioso que, interpretado como una afirmación literal sobre el mundo, contravenga la ley científica establecida es falso. Punto. Defender una interpretación literal así se sitúa a la misma altura que aceptar la existencia de Ramtha.

No obstante, la doctrina religiosa (o incluso la de Ramtha) puede mantenerse plenamente dentro del discurso racional si estamos dispuestos a apartarnos del literalismo, si hacemos una lectura selectiva de las escrituras, descartamos elementos que nos parezcan ofensivos o anticuados, interpretamos las historias y las declaraciones de manera poética o simbólica o, más simplemente aún, como elementos de un relato de ficción. Son muchas las razones que pueden llevarnos a ello. Quizá nos produzca dicha o sosiego contemplar nuestras vidas en el seno de una historia más amplia y, para algunos, más gratificante, al tiempo que damos poca relevancia a las cualidades sobrenaturales o metafísicas de la religión. Quizá encontremos algo valioso en la lectura de relatos religiosos, como si se tratara de un emotivo archivo que de manera simbólica capta cualidades esenciales de la condición humana. Quizá nos agrade afrontar el reto de desarrollar un sistema interpretativo que permita la convivencia de determinadas doctrinas religiosas y el conocimiento científico. Quizá nos resulte gratificante cubrir con una sensibilidad sagrada nuestra interacción con el mundo, como un barniz que imprima carácter a la experiencia sin negar la racionalidad. Quizá nos beneficiemos del apoyo y la solidaridad de la afiliación religiosa. Quizá nos

parezca emocionalmente enriquecedor participar en rituales religiosos, consagrando las transiciones de nuestra vida y marcando los días sagrados que nos enlazan con una tradición venerable. Todas esas maneras de experimentar la religión pueden ofrecernos actividad, motivación, comunidad y guía que, para algunos, dibujan el camino hacia una vida más rica y dotada de mayor significado. Y no nos obligan a creer en la naturaleza factual del contenido religioso, sino que reflejan una creencia en el valor de ese contenido, sea o no verídico.

Hace más de un siglo, William James nos brindó un análisis perceptivo y sentido de la experiencia religiosa que aún hoy encuentra eco en la observación del dalái lama acerca de la física y la conciencia. James recalcaba que mientras que la ciencia cultiva un enfoque objetivo e impersonal, solo podemos dar plena cuenta de la realidad cuando miramos nuestros mundos interiores, «el terror y la belleza de los fenómenos, la «promesa» del amanecer y el arcoíris, la «voz» del trueno, la «amabilidad» de la lluvia de verano, lo «sublime» de las estrellas, y no las leyes físicas que todas estas cosas obedecen»[38]. Como Descartes, James subrayaba que nuestra experiencia interior es, de hecho, nuestra «única» experiencia. La ciencia puede buscar una realidad objetiva, pero nuestra única puerta hacia esa realidad es a través del procesamiento subjetivo de la mente. La mente humana interpreta sin cansancio una realidad objetiva construyendo una realidad subjetiva.

Visto de este modo, si una práctica religiosa o, mejor dicho, una práctica espiritual, se emprende como una exploración del mundo interior de la mente, un viaje hacia dentro a través de la experiencia ineludiblemente subjetiva de la realidad, las cuestiones sobre si tal o cual doctrina refleja una verdad objetiva se tornan secundarias[39]. La indagación religiosa o espiritual no necesita buscar aspectos demostrables del mundo exterior; hay todo un paisaje interior por explorar, desde el terror y la belleza, la promesa y la voz, lo amable y lo sublime a lo que James hacía referencia, hasta la inacabable lista de constructos humanos, entre ellos el bien y el mal, el sobrecogimiento y el temor, el asombro y la gratitud, que hemos invocado durante toda nuestra historia para designar el valor o hallar significado. Por mucha atención que prestemos a la naturaleza de las partículas individuales, por mucha diligencia que pongamos en la búsqueda de las reglas matemáticas fundamentales de la naturaleza, no veremos nunca esos conceptos, que solo emergen cuando unas configuraciones de partículas especialmente complejas evolucionan hasta adquirir la capacidad de pensar, sentir y reflexionar. Qué espectacular, qué

gratificante es que existan esas colecciones de agitadas partículas que, actuando bajo el control inflexible de la ley física, son sin embargo capaces de traer al mundo aquellas cualidades.

Para mí, la analogía de cómo las metáforas más afiladas del lenguaje se gastan hasta quedar romas con el tiempo pone de manifiesto una cuestión esencial, no por obvia menos reveladora: muchas de las religiones del mundo son antiguas. Eso es vital. Nos dice que durante siglos, si no milenios, una práctica religiosa ha cautivado la atención de personas y que, en diversas combinaciones, ha proporcionado la estructura del ritual, ha dado sentido al lugar de estas en el mundo, ha guiado la sensibilidad moral, ha inspirado la creación de obras de arte, ha ofrecido la participación en un relato grandioso, ha prometido que la muerte no es el fin, y, por descontado, también ha intimidado con duros castigos, ha alentado a algunos a librar violentas batallas, ha justificado la esclavización y muerte de los transgresores, y tantas otras cosas. Unas buenas, otras malas, otras decididamente horrendas. Pero a través de todo ello, esas tradiciones religiosas han perdurado. Aunque no nos ofrezca conocimiento sobre una base verificable de la realidad (que es de lo que se ocupa la ciencia), la religión ha brindado a algunos de sus seguidores un sentido de coherencia que ha dotado su vida de contexto, situando lo familiar y lo extraño, las dichas y las desgracias, dentro de una historia más grandiosa. Y por ello las religiones venerables del mundo engendran linajes que enlazan a sus seguidores a través de los siglos.

Yo me crie como judío. Mi familia asistía a los servicios religiosos en las principales festividades, y estuve matriculado en una escuela local hebrea. La llegada anual de nuevos estudiantes significaba que la clase recomenzaba cada año con el alfabeto hebreo, así que me sentaba tranquilamente a un lado y hojeaba el Antiguo Testamento. Me quejaba con amargura a mis padres, pero lo cierto es que me gustaba leer sobre Samuel y Absalón, sobre Ismael y Job y todos los demás. Con los años me fui distanciando de la religión, pues apenas sentía la necesidad de participar de manera formal. Entonces, durante un descanso de mis estudios de doctorado en Oxford, visité Israel. Un rabino demasiado apasionado se enteró de algún modo de que un joven físico norteamericano deambulaba por las calles de Jerusalén. Se las arregló para encontrarlo y, acompañado de estudiosos talmúdicos que «también indagaban sobre el origen del universo», lo convenció (o más bien presionó) para que aquel excesivamente respetuoso estudiante de veintitantos años visitase su templo y envolviese sus brazos y frente con el ajuar de cuero típico del ritual de los tefilín o filacterias. Para el rabino, aquello era la voluntad de Dios en

acción. El estudiante estaba destinado a ser traído de vuelta al corral. Para mí, era una torpe coacción para que participase en una práctica sagrada pese a carecer de la menor convicción interior. Cuando por fin me despojé de las bandas de cuero y abandoné el templo, supe que allí había acabado todo.

Pese a ello, cuando falleció mi padre, la diaria congregación en mi sala de estar de un *minyán*, es decir, de más de diez varones judíos practicantes, para rezar el kadish me produjo un gran sosiego. Mi padre, que tampoco fue un hombre religioso, era acogido entonces por una tradición que se remontaba miles de años, experimentaba un ritual administrado a muchos otros antes que a él. Las palabras religiosas que cantaban aquellos hombres poco importaban. Eran voces arameas, una colección de sonidos antiguos, una poesía tribal imprimida de cadencia y ritmo, y su traducción no me interesaba en lo más mínimo. Lo que me importaba durante aquellos breves momentos, la naturaleza, si así se quiere, de mi creencia, era la historia y la conexión. Esa es, para mí, la grandeza del legado. Esa es, para mí, la majestad de la religión.

8

INSTINTO Y CREATIVIDAD

De lo sagrado a lo sublime

El 7 de mayo de 1824, Ludwig van Beethoven apareció en escena en el Theater am Kärntnertor de Viena para el estreno de su novena y última sinfonía. Era la primera aparición pública de Beethoven en casi doce años. El programa anunciaba que el compositor solo asistiría en la dirección, pero al ver que el teatro se llenaba y el público hervía de expectación, no pudo contenerse. Según el primer violín, Joseph Böhm:

> Dirigió el propio Beethoven, o más bien se subió a la tarima del director y se movió adelante y atrás como un demente. Si en un momento se estiraba tan alto como podía, al siguiente se agachaba contra el suelo, o agitaba las manos y los pies como si él mismo quisiera tocar cada uno de los instrumentos y cantar el coro entero[1].

Beethoven sufría de un grave acúfeno, que describía como un bramido en sus oídos, y a estas alturas de su vida estaba casi sordo por completo. Por eso cuando la orquesta tocó su última nota triunfal, sin darse cuenta se había quedado unos compases por detrás y seguía dirigiendo apasionadamente. El contralto tomó con amabilidad a Beethoven por la manga y le indicó que se diera la vuelta para encarar la audiencia, que gritaba de emoción agitando sus pañuelos. Beethoven sollozó. ¿Quién le hubiera dicho que unos sonidos que solo había oído en su mente habrían de tocar una fibra universal en el corazón de la humanidad?

Los mitos y religiones nos revelan cómo intentaron nuestros antepasados dar sentido al mundo colectivamente. Aunando narración, ritual y creencia,

nuestras tradiciones han buscado, unas veces con compasión, otras con indecible brutalidad, un relato que explique el viaje hasta el presente y que nos dé aliento para continuar en el futuro. Como individuos, hemos hollado ese mismo camino, apoyándonos en el instinto y el ingenio para sobrevivir al tiempo que buscamos el sentido o las razones por las que eso deba importarnos. A lo largo de este camino, algunos consiguen captar la coherencia de la realidad de nuevas y sorprendentes maneras, y nos ofrecen reflexiones por medio de obras de literatura, arte, música y ciencia que redefinen nuestro sentido del yo y enriquecen nuestra relación con el mundo. El espíritu creativo, que ya llevaba tiempo tallando estatuillas, coloreando paredes de cuevas y contando historias, estaba preparado para alzar el vuelo.

Algunas mentes extraordinarias, escasas en número pero presentes en todas las épocas, modeladas todas ellas por la naturaleza y, algunas, por una imaginada inspiración divina, descubrirían nuevas maneras de articular lo trascendental. Sus odiseas creativas expresarían una forma de la verdad que se sitúa más allá de la deducción o la validación, y que presta su voz a cualidades definitorias de la naturaleza humana que permanecen calladas hasta que se sienten.

Crear

La sensibilidad a los patrones se cuenta entre nuestras más poderosas habilidades para la supervivencia. Como ya hemos visto repetidamente, observamos patrones, experimentamos patrones y, lo que es más importante, aprendemos de los patrones. Si tropiezo una vez con una piedra, no es culpa mía. Si tropiezo dos veces con la misma piedra, quizá sea prematuro echarme la culpa, pero a la tercera va la vencida y asumir la responsabilidad está más que justificado. Aprender de las pautas es un talento esencial para la supervivencia que la evolución ha imprimido en nuestro ADN. Unos alienígenas que bajasen a la Tierra quizá funcionasen con una bioquímica distinta, pero probablemente no tendrían problema para entender este concepto, pues casi con certeza podríamos decir que el análisis de patrones también habría sido esencial para su éxito.

Aun así, ese intercambio intergaláctico no sería un encuentro de mentes perfecto. Algunos de los patrones que más apreciamos podrían dejar perplejos

a nuestros visitantes de otros mundos. Colocamos determinados pigmentos sobre un lienzo blanco, tallamos de tal o cual manera un bloque de mármol o generamos ciertas vibraciones en las moléculas del aire, creando de estos modos determinados patrones de luz, textura o sonido, y al encontrarnos con esos patrones los humanos podemos sentir cómo la realidad se nos muestra de una forma que nunca antes habríamos imaginado. Durante un breve pero en apariencia ilimitado momento, podemos sentir cómo nuestro lugar en el mundo se mueve como si nos hubiesen transportado a otra esfera. Si los alienígenas han tenido este tipo de experiencias, sabrán de qué estamos hablando. Pero cuando expliquemos nuestra respuesta interior a las obras creativas, es posible que nos miren atónitos. Y como el lenguaje llega donde llega a la hora de describir estas experiencias, los alienígenas tal vez manifestarían una expresión de pasmo mientras viajan de continente en continente y ven cómo en gran número, algunos por su cuenta, otros en grupo, los miembros de nuestra especie nos concentramos intensamente, nos abstraemos, seguimos el ritmo o danzamos cuando nos dejamos envolver por los mundos del arte y la música.

Desconcertados ante nuestra respuesta a la expresión artística, los visitantes alienígenas puede que se sintiesen tanto o más perplejos ante la creación de esas obras. La página en blanco. El lienzo impoluto. El informe bloque de mármol. La pella de barro. La partitura vacía que aguarda la inspiración del compositor, o que, una vez compuesta, espera a ser tocada. O cantada. O bailada. Algunos de nuestra especie pasan días y noches imaginando formas que extraer de lo informe sonidos que arrancar al silencio. Algunos dedicarán lo mejor de su energía y de su vida a hacer realidad esas visiones imaginativas, produciendo patrones en el espacio y el tiempo que pueden ser admirados, o detestados, o ignorados, o juzgados como la esencia misma de la existencia. «Sin música —dijo Friedrich Nietzsche—, la vida sería un error»[2]. Y, en palabras de la Ecrasia de George Bernard Shaw, «Sin arte, la crudeza de la realidad haría que el mundo fuese insoportable»[3]. Pero ¿qué enciende la llama de la imaginación? ¿Está catalizada por instintos comportamentales modelados por la selección natural? ¿O, al contrario, llevamos mucho tiempo gastando unos valiosos recursos de tiempo y energía en proyectos artísticos que guardan poca relación con la supervivencia y la reproducción?

Somos lanzados al mundo sin que nadie nos consulte, y una vez en él se nos concede la oportunidad de gozar de la vida durante apenas un instante. Cuán elevado es tomar las riendas de la creación y crear algo que

controlamos, algo intrínsecamente nuestro, algo que refleja quiénes somos, que capta nuestra particular forma de comprender la naturaleza humana. Aunque muchos no querríamos cambiarnos por Shakespeare o Bach, Mozart o Van Gogh, O'Keeffe o Dickinson, sí desearíamos ser infundidos de su maestría creativa. Iluminar la realidad con faros de nuestra propia creación, emocionar al mundo con obras que fluyen por nuestra particular configuración de moléculas, construir experiencias que superen la prueba del tiempo, todo ello nos parece absolutamente romántico. Para algunos, hay magia en el proceso creativo, un impulso irreprimible de expresarse a sí mismos. Otros lo ven como una oportunidad para elevar su estatus y estima. Incluso otros sienten la llamada de la eternidad, pues, como dijo Keith Haring, nuestras creaciones artísticas son «una búsqueda de la inmortalidad»[4].

Si la creación y el consumo de obras de la imaginación fuese una aportación reciente al comportamiento humano, o si estas actividades solo se hubiesen practicado de forma infrecuente a lo largo de nuestra historia, sería improbable que nos revelasen cualidades universales de nuestra naturaleza humana fruto de la evolución. Después de todo, algunas cosas, como los pantalones de campana o los plátanos fritos, son el resultado de peculiaridades contingentes, así que desentrañar los detalles de sus linajes históricos no es demasiado iluminador. Pero la realidad es que desde el pasado más remoto y en todas las tierras que habitamos hemos cantado y danzado, compuesto y pintado, esculpido y tallado, y también escrito. Las pinturas rupestres y los elaborados ajuares funerarios, como los que comentamos en el capítulo anterior, se remonta a hace treinta o cuarenta mil años. Y los grabados y artefactos que hemos descubierto y que son indicios de una expresión artística datan de varios cientos de miles de años antes[5]. Nos encontramos, pues, con un comportamiento generalizado que, sin embargo, a diferencia de comer, beber y procrear, no nos muestra abiertamente su valor de supervivencia.

A una sensibilidad moderna esto no le parecerá enigmático. Experimentar una obra que alimenta el alma o nos emociona hasta las lágrimas equivale a traspasar los límites de lo cotidiano, y ¿quién no desea una experiencia así? Pero al igual que ocurre con la observación superficial de que comemos helado porque nos gusta lo dulce, esta explicación se centra únicamente en nuestras respuestas directas y, por consiguiente, está limitada al ímpetu más inmediato hacia nuestras inclinaciones creativas. ¿Podemos llegar más al fondo de la cuestión? ¿Podemos averiguar por qué nuestros antepasados

estaban tan dispuestos a dar la espalda a los retos reales de la supervivencia para dedicar un tiempo, una energía y un esfuerzo muy valiosos abandonándose a la imaginación?

Sexo y tarta de queso

Ya exploramos una pregunta parecida cuando nos encontramos a nuestros antepasados contando historias, y la respuesta más convincente nos llevó a la metáfora del simulador de vuelo: el uso creativo del lenguaje nos permite ensayar perspectivas familiares y extrañas, y de este modo ampliar y mejorar nuestras respuestas ante los acontecimientos del mundo real. Contando historias, escuchándolas, adornándolas, repitiéndolas, pudimos jugar con lo posible sin sufrir las consecuencias. Seguimos infinidad de senderos que comenzaban con un «¿y si…?» y, a través de la razón y la fantasía, exploramos una gran variedad de resultados posibles. Nuestras mentes deambularon libres por el paisaje de la experiencia imaginada, y en ella encontramos una nueva agilidad de pensamiento que posiblemente fuese valiosa para la supervivencia.

A la hora de considerar formas de arte más abstractas, conviene revisar esta explicación. Una cosa es imaginar la mente bruñendo los ideales del valor y el heroísmo por medio de fascinantes relatos de batallas ganadas con esfuerzo o cautivadoras narraciones de peligrosas aventuras, y otra muy distinta argumentar que la mente ejercitó su músculo adaptativo escuchando a la Édith Piaf o el Ígor Stravinski del Pleistoceno. La brecha que se abre entre experimentar la música (o la pintura, la danza o la escultura) y superar los desafíos del mundo ancestral parece insalvable.

El propio Darwin, motivado por el célebre enigma evolutivo de la cola del pavo real, reflexionó sobre la posible función adaptativa de un sentido artístico innato. La cola larga y vivamente coloreada del pavo real es difícil de esconder, y un estorbo cuando hay que huir de un depredador. ¿Cómo puede haber evolucionado una estructura tan vistosa y bella pero aparentemente maladaptativa? La respuesta a la que llegó Darwin con gran consternación fue que la cola del pavo real, aunque un incordio en la lucha por la existencia, es una parte esencial de su estrategia reproductiva. No es solo a nosotros, los humanos, a quienes este atributo resulta atractivo. También atrae a las pavas,

seducidas por las brillantes plumas, de modo que cuanto más impresionante sea la cola, más probable será que el pavo real encuentre pareja. La progenie resultante tendrá una alta probabilidad de heredar los rasgos del padre y los gustos de la madre, propagando una guerra genética en la que las batallas no se ganan adquiriendo más alimento o consiguiendo mayor seguridad, sino produciendo las colas más esplendorosas.

Este es un ejemplo de la «selección sexual», un mecanismo evolutivo darwiniano movido por la obtención de parejas reproductoras. Un pavo real que muere joven no logra reproducirse, por eso la selección natural favorece a quienes sobreviven. Pero el mismo fracaso reproductor experimentará un pavo real que viva felizmente mucho tiempo pero sea eludido por todas sus parejas potenciales. Para influir en la constitución genética de las generaciones futuras, la supervivencia es necesaria, pero no suficiente. Producir descendencia es lo importante, así que las características que promueven el apareamiento gozan de una ventaja selectiva, a veces incluso a expensas de la seguridad[6]. Esos costes no pueden ser astronómicos (hay un límite para lo resplendente que puede ser una cola antes de que la supervivencia se vea excesivamente comprometida), pero tampoco pueden ser nulos. Y aunque las plumas del pavo real es el ejemplo más recurrido, se pueden hacer consideraciones parecidas acerca de un gran número de especies. El saltarín barbiblanco se pavonea y canta en unos círculos de musgo para atraer a los hembras, las luciérnagas realizan hipnóticos cortejos en los que el éxito se mide por la finura de sus espectáculos de vuelos y luces, los machos de los pergoleros construyen unos elaborados emparrados, una suerte de pisitos de soltero que arman trenzando ramitas, hojas, conchas y, si cuadra, brillantes envoltorios de caramelo, una ostentación que aparentemente no sirve para otra cosa que para seducir a su futura pareja[7].

Cuando, en 1871, Darwin describió la selección sexual en *El origen del hombre y la selección en relación con el sexo*, que por su longitud se publicó en dos volúmenes, su propuesta no obtuvo un éxito inmediato. A muchos de sus coetáneos les parecía inconcebible que en el ámbito salvaje de los animales no humanos el comportamiento pudiera apoyarse en respuestas estéticas[8]. Y no porque Darwin imaginase pájaros o ranas absortos en ensoñaciones poéticas o embelesados por el rubor de la puesta de sol tras el horizonte. El sentido estético que proponía se centraba únicamente en la selección de pareja. Aun así, parecía una frivolidad que Darwin asignase un «gusto por la belleza»[9] a una amplia sección del reino animal. Le parecía

impropia incluso a Alfred Russel Wallace, que veía en las sensibilidades estéticas de los humanos un don divino[10].

Pero si no apelamos a una sensibilidad innata hacia la belleza, ¿cómo explicamos los suntuosos adornos corporales, las exhibiciones creativas y las construcciones físicas que forman parte integral de incontables juegos de cortejo en el reino animal? Pues bien, hay un enfoque menos elevado. Pensemos de nuevo en la cola del pavo real. Aunque los humanos apreciemos la estética de su plumaje, en una pava debe desencadenar una respuesta instintiva de considerable importancia genética. Los pavos reales adornados con un deslumbrante plumaje son fuertes y sanos, y eso incrementa la probabilidad de que su descendencia también sea fuerte. Y como las pavas, igual que las hembras de muchas especies, pueden producir mucha menos descendencia que los machos, han desarrollado una preferencia especialmente determinantes hacia los pavos más aptos, porque esas uniones aumentan las posibilidades de éxito de fecundación, una actividad que consume valiosos recursos[11]. Si el plumaje resplandeciente es una demostración visible de la fuerza y vigor de una posible pareja, las hembras atraídas por las colas más esplendorosas tendrán una probabilidad mayor de engendrar una progenie robusta. Esta, a su vez, en cierta proporción poseerá los genes que los llevarán a desear o adquirir un plumaje esplendoroso, facilitando de este modo la difusión de estos rasgos en generaciones futuras. La belleza, en este análisis de la selección sexual, no es superficial, sino que equivale a unas credenciales públicas que dan fe de la aptitud adaptativa de la posible pareja.

En cualquier caso, tanto si la elección de pareja se debe a una sensibilidad estética como a una evaluación de su salud, las preferencias resultantes explican unos rasgos, corporales o comportamentales, que son costosos, pero cuyo valor intrínseco para la supervivencia es cuestionable. Como esta descripción podría aplicarse también a las prácticas artísticas remotas y esencialmente universales de nuestra especie, quizá la selección sexual sea iluminadora. Darwin así lo creía, pues apeló a la selección sexual para explicar la afición de los humanos por las perforaciones y coloraciones corporales, y sugirió que la poderosa respuesta que puede suscitar la música es un resultado evolutivo de la actuación de la selección sexual sobre las llamadas humanas de cortejo. Los machos que mejor cantasen o danzasen, o que tuvieran los tatuajes o adornos más atractivos, habrían sido deseados por las hembras más exigentes, y con mayor probabilidad habrían engendrado una progenie con mayor sensibilidad artística. En los encuentros entre sexos, el talento artístico podría haber determinado si el chico volvía solo a casa.

Desde hace unos años, el psicólogo Geoffrey Miller, y también el filósofo Denis Dutton, vienen desarrollado más esta perspectiva. Estos pensadores sugieren que las capacidades artísticas humanas proporcionan un indicador de aptitud o *fitness* que las hembras perceptivas someten a examen[12]. No es ya que los artefactos de buena factura, las exhibiciones creativas o las representaciones enérgicas demuestren una mente y un cuerpo que funcionan a pleno rendimiento, también atestiguan que el artista está generosamente dotado con lo necesario para sobrevivir. Al fin y al cabo, continúa el razonamiento, un artista solo puede permitirse la extravagancia de dedicar tiempo y esfuerzo a actividades que carecen de valor para la supervivencia si ya posee los recursos materiales y la destreza física. (Por lo que parece, los artistas del Pleistoceno eran de todo menos muertos de hambre.) De acuerdo con esta perspectiva, los proyectos artísticos se resumen en una estrategia de mercadotecnia para la propia promoción que tiene como resultado uniones entre artistas de talento y parejas con buen criterio, cuya progenie tendría una mayor probabilidad de estar dotada de rasgos parecidos.

La selección sexual como motor evolutivo de la actividad artística de los humanos es interesante, pero ha generado más controversias que consensos. Otros investigadores han planteado numerosas preguntas: ¿es el talento artístico una señal precisa de la salud física? ¿No podría ser que las capacidades artísticas estuviesen tan entrelazadas con la inteligencia y la creatividad, una cualidad de indiscutible valor para la supervivencia, que las predilecciones por el arte se extendiesen por medio de la selección natural, sin necesidad de apelar a la selección sexual? Con la selección sexual centrada en artistas masculinos, ¿cómo explica la teoría las actividades artísticas del género femenino? Y lo que tal vez sea el mayor desafío, la práctica pública de actividades artísticas durante el Pleistoceno, así como los rituales de cortejo y de apareamiento de esa época, son, en muy gran medida, conjeturas. Por legendarias que sean las conquistas de Lucian Freud y Mick Jagger, ¿qué nos dicen, si es que nos dicen algo, acerca de la importancia de las habilidades artísticas o la presencia en el escenario con relación al éxito reproductor de los primeros homininos? A la luz de estas y otras cuestiones, Brian Boyd resume con cautela: «La selección sexual ha sido una marcha más para el arte, no el propio motor»[13].

Steven Pinker sugiere una perspectiva completamente distinta sobre la utilidad adaptativa de las artes. En un pasaje citado tan a menudo por defensores como por detractores, argumenta que todas las disciplinas artísticas, salvo las del lenguaje, se reducen a postres nutricionalmente

decadentes servidos a unos cerebros humanos hambrientos de patrones. Del mismo modo que «la tarta de queso encierra una explosión sensual que no se encuentra en el mundo natural porque es una mezcla de megadosis de estímulos agradables que confeccionamos con el propósito expreso de pulsar nuestros botones del placer»[14], también las artes son, para Pinker, unas creaciones adaptativamente inútiles diseñadas para excitar unos sentidos humanos que evolucionaron para promover la eficacia biológica de nuestros antepasados. Este no es un juicio de valor. La bien trabada argumentación de Pinker, repleta de alusiones culturales, deja claro que siente un profundo afecto por las artes. Al contrario, se trata de una valoración desapasionada de si las actividades artísticas han desempeñado algún papel en una tarea particular: mejorar las probabilidades de que en el mundo ancestral pasasen a la siguiente generación los genes de nuestros ancestros, y no los de nuestros filisteos primos, ayunos de arte, sordos a la melodía, desmañados en los movimientos. Solo en este sentido argumenta Pinker que las artes son irrelevantes.

No cabe duda de que la evolución nos ha llevado a desarrollar una serie de comportamientos dirigidos a incrementar nuestra eficacia biológica, desde encontrar alimento, conseguir pareja y hallar refugio hasta establecer alianzas, repeler adversarios e instruir a la progenie. Los comportamientos hereditarios que, por término medio, producían un mayor éxito reproductor se extendieron ampliamente hasta convertirse en los mecanismos más corrientes para superar desafíos adaptativos particulares. Para modelar algunos de estos comportamientos, una de las zanahorias utilizadas por la evolución fue el placer: si ciertos comportamientos que promueven la supervivencia nos resultan placenteros, estaremos más dispuestos a ejercitarlos. Y gracias a sus cualidades para mejorar la supervivencia, incrementarán la probabilidad de que sigamos vivos el tiempo suficiente para reproducirnos, dotando así a las futuras generaciones de tendencias de comportamiento parecidas. De este modo, la evolución genera una colección de bucles de realimentación positiva que llevan a que los comportamientos que mejoran la eficacia biológica nos resulten placenteros. Para Pinker, las artes cortan los bucles de realimentación, cercenan los beneficios adaptativos y estimulan directamente nuestros centros de placer, brindándonos experiencias gratificantes que desde una perspectiva evolutiva no están justificadas. Nos gusta lo que nos hacen sentir las artes, pero ni crearlas ni experimentarlas nos vuelven más aptos o más atractivos. Desde el punto de vista de la supervivencia, las artes son comida basura.

La música es el ejemplo predilecto de Pinker, el género de las artes cuya irrelevancia adaptativa explica con mayor detalle. Sugiere que esta es un parásito auditivo que saca partido de unas sensibilidades de nuestro oído que evocan emociones y que hace mucho tiempo gozaron de valor para la supervivencia de nuestros antepasados. Por ejemplo, los sonidos de frecuencias relacionadas en armonía (frecuencias que son múltiplos de una frecuencia común) indican un origen único y potencialmente identificable (la física básica revela que cuando un objeto lineal vibra, ya sean las cuerdas vocales de un depredador, ya un arma hecha de hueso hueco, las frecuencias de las vibraciones tienden a llenar una serie armónica). Aquellos de nuestros antepasados que manifestaban una respuesta más placentera a aquellos sonidos organizados habrían puesto en ellos más atención y, por consiguiente, habrían sido más conscientes de su entorno. Esa atención aumentada inclinaría a su favor la balanza de la supervivencia, mejorando su bienestar y promoviendo un mayor desarrollo de la sensibilidad auditiva. Una mayor receptividad hacia otros sonidos ricos en información, desde los truenos a las pisadas o los crujidos de las ramas, habrían afinado aún más su atención y amplificado su conciencia del entorno. Por consiguiente, aquellos de nuestros antepasados que estuviesen más en sintonía con los sonidos poseerían una ventaja en términos de eficacia biológica, y eso habría fomentado la diseminación de la sensibilidad auditiva de generación en generación. A juicio de Pinker, la música secuestra esa sensibilidad a los sonidos y se la lleva a una escapada de placer sensual que no confiere ningún valor adaptativo. De modo parecido a como la tarta de queso estimula artificialmente nuestra antigua preferencia adaptativa por los alimentos de alto contenido calórico, la música estimula de manera falsa nuestra antigua sensibilidad hacia los sonidos con un elevado contenido de información.

La yuxtaposición que establece Pinker entre el placer culpable y la experiencia exquisita resulta discordante. Y de manera intencionada. Su objetivo no es desmerecer el arte, sino ensanchar el significado que le atribuimos. Es cierto que identificar un fundamento evolutivo a tal o cual comportamiento humano, imprimiendo de este modo en nuestro ADN un indeleble sello de aprobación, nos satisface inmensamente. ¡Qué gratificante imaginar que las artes, que muchos juzgan uno de los logros más exaltados de la humanidad, desempeñaron un papel esencial en la propia supervivencia de la especie! Pero por mucho que nos agrade, esa explicación no tiene por qué ser cierta. Ni esencial. La adaptación biológica no es el único patrón de valor. Es igual de prodigioso que podamos elevarnos por encima de nuestras

preocupaciones por la supervivencia y usar la imaginación para expresar algo bello o perturbador o conmovedor. La importancia no requiere utilidad adaptativa. Hace años, durante una cena familiar en un restaurante del barrio, un camarero llevó tarta de queso a una mesa cercana, y mi madre, que siempre estaba a régimen, sintió la necesidad de levantarse y saludar, un gesto de respecto que puede aplicarse no solo al propio postre, sino a los comportamientos humanos comunes que, en la opinión de Pinker, le han valido a ese postre la clasificación adaptativa.

Imaginación y supervivencia

El reconocimiento de que las artes no tienen por qué avergonzarse de carecer de utilidad adaptativa no ha disuadido a algunos investigadores de seguir buscando explicaciones darwinianas simples de su carácter ubicuo y perdurable. Explicaciones, dicho de otro modo, que intentan establecer vínculos directos entre las actividades artísticas y la supervivencia de nuestros antepasados. A este respecto, la antropóloga Ellen Dissanayake ha subrayado la necesidad de considerar las artes tal como se practicaban en los contextos ancestrales, argumentando que a lo largo de la historia humana, el arte, y también la religión, no eran entretenimientos extracurriculares «a los que uno se abandonaba una mañana a la semana o cuando no tenía nada mejor que hacer, ni pasatiempos superfluos que uno pudiera desatender sin problema»**[15]**. Tanto si se trataba de descender profundamente bajo tierra para adornar la pared de una caverna como de tocar el tambor, bailar y cantar enloquecidos en un trance místico, el arte, como la religión, estaba tejido en la propia urdimbre de nuestra existencia ancestral. Y ahí es donde yace su potencial papel adaptativo.

Si unos extraterrestres hubiesen visitado la Tierra durante el Paleolítico y apostado sobre quién triunfaría un millón de años más tarde, pocos se la habrían jugado con el género *Homo*. Sin embargo, juntando pasión y cerebro, conseguimos prevalecer sobre otras formas de vida más grandes, más fuertes y rápidas, o dotadas de más agudos sentidos del olfato, la vista o el oído. Triunfamos porque somos habilidosos y creativos, sin duda, pero por encima de todo porque somos excepcionalmente sociales. En capítulos anteriores comentamos varios mecanismos, desde la narración de historias a la religión o

la teoría del juego, que podrían haber facilitado nuestra capacidad para unirnos en grupos productivos. Pero como este comportamiento es tan influyente como complejo, una única explicación puede ser insuficiente. Es más probable que varias amalgamas de esos mecanismos hayan contribuido al éxito de nuestra tendencia a reunirnos en grupos, y, como han sugerido Dissanayake y otros investigadores, la lista de influencias prosociales debería incluir el arte.

Si dos personas confían en que sabrán entender y predecir mutuamente sus respuestas emocionales, incluso cuando se enfrentan a desafíos poco familiares o persiguen nuevas oportunidades, será más probable que cooperen con éxito. Las artes podrían haber sido esenciales para conseguir justamente eso. Si esas dos personas y otras de su grupo fuesen participantes asiduos de las mismas experiencias artísticas ritualizadas, juntándose a través del ritmo, la melodía y los movimientos enérgicos, la unidad de esos intensos viajes emocionales crearía un sentido de solidaridad comunitaria. Cualquiera que haya participado en actividades en grupo tocando los bombos o cantando o bailando sabe de qué hablo, y a quien no lo haya hecho, se lo recomiendo mucho. Esos episodios emocionales compartidos, intensos y en apariencia desbordantes, debieron unirnos en un todo más comprometido. En palabras de Noël Carroll, un filósofo que también se ha situado a la vanguardia de estas ideas: «El arte siempre ha excitado y modelado emociones que unen a quienes las experimentan inculcándoles la sensación de formar parte de una cultura»[16]. Y, de hecho, la propia noción de cultura como conjunto ampliamente compartido de tradiciones, costumbres y perspectivas depende de una herencia común de práctica y experiencia artística. Los miembros de esos grupos con emociones sintonizadas debían de tener una mayor probabilidad de sobrevivir y transmitir a las generaciones posteriores una tendencia genética hacia esos comportamientos.

Ahora bien, el lector que no haya quedado convencido por la cohesión de grupo como explicación adaptativa de la religión seguro que tampoco admitirá la cohesión de grupo como explicación adaptativa del arte. Pero, tal como ocurría con la religión, no tenemos por qué centrarnos únicamente en grupos. El arte podría haber tenido una utilidad adaptativa directa para el individuo, una perspectiva que me parece bastante persuasiva. Las artes ofrecen un ámbito emancipado de la esclavitud impuesta por la verdad llana y la realidad física cotidiana, y eso permite que la mente salte, ruede y se retuerza a gusto mientras explora todo tipo de novedades imaginadas. Una mente que de manera asidua se ciñe a lo que es verdadero queda restringida a

un ámbito de posibilidades delimitado por completo. Una mente habituada a traspasar las fronteras entre lo real y lo imaginario, pero teniendo siempre claro qué es qué, se torna experta en romper las ataduras del pensamiento convencional. Es una mente preparada para la innovación y la inventiva. La historia lo deja bien claro. Muchos de los grandes avances de la ciencia y la tecnología se los debemos a individuos que lograron examinar los mismos problemas a los que se habían enfrentado generaciones anteriores de pensadores, pero con la flexibilidad de pensamiento necesaria para verlos de una manera distinta.

El paso esencial de Einstein hacia la relatividad no se produjo a instancias de nuevos datos o experimentos. De hecho, trabajaba con datos (sobre electricidad, magnetismo, luz) que eran de sobra conocidos. Al contrario, el paso más audaz que dio Einstein fue el que lo liberó de la suposición generalmente admitida de que el espacio y el tiempo eran constantes, lo cual requería que la velocidad de la luz fuese variable, y en su lugar concibiese como variables el espacio y el tiempo. Este resumen como de titular no pretende explicar la relatividad especial (para ello refiero al lector, por ejemplo, al capítulo 2 de *El universo elegante*), sino resaltar que lo que hizo posible el descubrimiento fue imaginar una reordenación simple pero fundamental de las piezas de Lego de la realidad, una inversión de patrones simbólicos tan familiares que la mayoría de las mentes pasaron por alto la posibilidad. Es un tipo de maniobra creativa que encuentra eco en los más altos niveles de la composición artística. En opinión del ilustre pianista Glenn Gould, el genio de Bach se demuestra en su habilidad para concebir líneas melódicas «que después de ser traspuestas, invertidas, retrogradadas o transformadas en cuanto a ritmo, presentan […] un perfil nuevo por completo, pero perfectamente armónico»[17]. El genio de Einstein descansa en una habilidad parecida, y del mismo modo asombrosa, para reconfigurar las piezas de construcción de nuestro conocimiento, conseguir ver de forma nueva unos conceptos que hacía décadas, si no siglos, que se estudiaban, y combinarlos de acuerdo con un nuevo plano de diseño. Quizá no deba sorprendernos, pues, que Einstein describiera su proceso intelectual como «pensar en música», y que con frecuencia echase mano de exploraciones visuales, sin ecuaciones ni palabras. El arte de Einstein consistía en escuchar ritmos y visualizar patrones que revelaban una unidad profunda en el funcionamiento de la realidad.

Ni la relatividad de Einstein ni las fugas de Bach están hechas de la sustancia propia de la supervivencia. Ambas, sin embargo, son ejemplos

consumados de capacidades humanas que fueron esenciales para el éxito de nuestra especie. El vínculo entre la aptitud científica y la resolución de los retos del mundo real puede ser más manifiesto, pero las mentes que razonan con ayuda de analogías y metáforas, las que usan color y textura en sus representaciones, las que imaginan mediante el ritmo y la melodía, cultivan un paisaje cognitivo más floreciente. Por todo ello, las artes bien podrían haber sido esenciales para el desarrollo del pensamiento flexible y la fluida intuición que nuestros parientes necesitaron para diseñar lanzas, inventar la cocina, dominar la rueda, y, más tarde, escribir la «Misa en si menor» y, más tarde aún, resquebrajar nuestra rígida perspectiva del espacio y el tiempo. A lo largo de cientos de miles de años, las artes podrían haber sido el patio de juegos de la cognición humana, un ámbito libre donde ensayar nuestras aptitudes imaginativas e infundir en ellas una poderosa capacidad de innovación.

Cabe notar, además, que los papeles adaptativos que sopesamos para el arte, es decir, aguzar el ingenio y fortalecer los vínculos sociales, actúan de manera conjunta. Si la innovación es el peón de la creatividad, la cohesión de grupo es el ejército de la implementación. En la implacable batalla por la supervivencia se precisa de ambas: ideas creativas que se pongan en práctica. Que las artes actúen de nexo sugiere un papel adaptativo que va más allá de pulsar los botones del placer. No cabe duda de la posibilidad de que las artes no pasen de ser un subproducto adaptativamente inconsecuente, aunque bastante gratificante, de un cerebro de gran tamaño que aloja una mente creativa, pero para muchos investigadores esta perspectiva no presta suficiente atención a la capacidad del arte para esculpir nuestra interacción con la realidad. Brian Boyd lo ha dicho de forma sucinta:

> Refinando y fortaleciendo nuestra sociabilidad, preparándonos para utilizar los recursos de la imaginación, reforzando nuestra confianza en que podemos modelar la vida en nuestros propios términos, el arte altera de manera fundamental nuestra relación con el mundo**[18]**.

Por mi parte, me decanto por la perspectiva de que aguzar el ingenio, ejercer la creatividad, ensanchar las perspectivas y promover la cohesión proporciona un patrón para entender de qué modo las artes desempeñan un papel en la selección natural. Bajo este punto de vista, las artes se unen al lenguaje, las historias, el mito y la religión como medios que usa la mente humana para pensar simbólicamente, razonar en contra de lo manifiesto, imaginar con

libertad y trabajar de manera colaborativa. Con el paso de los milenios, son estas capacidades las que han engendrado nuestro propio mundo, rico en cultura, ciencia y tecnología. En cualquier caso, si otros se inclinan por creer que el papel evolutivo del arte se parece al de los postres cremosos, podemos estar de acuerdo al menos en que las diversas expresiones artísticas han sido siempre una presencia valiosa a lo largo de la historia de la humanidad. Y eso significa que las vidas interiores y los intercambios sociales han adoptado formas de implicación emocional que no valoran de manera primordial la información factual transmitida por medio del lenguaje.

¿Qué nos dice eso sobre el arte y la verdad?

Arte y verdad

Hace unos veinte años, en uno de esos soberbios días soleados de otoño, cuando las hojas se tornan rojas y anaranjadas, conducía solo de Nueva York a la casa familiar, en el norte del estado, cuando, sin saber muy bien desde dónde, se me cruzó un perro. Pisé el pedal del freno al instante, pero justo antes de que el automóvil se detuviese noté un golpe estremecedor, seguido muy de cerca por otro, el producido por las ruedas delanteras primero y las traseras después al atropellar al animal. Salté del coche y coloqué aquella perra, todavía con vida pero apenas sin movimiento, en el asiento del acompañante y partí a toda prisa por carreteras secundarias en busca de un veterinario. A los pocos minutos, la perra de algún modo consiguió erguirse. Posé la mano suavemente sobre su cabeza, que ella sostenía contra su cuerpo, apoyada en el respaldo del asiento. Paré en el arcén. Y me miró con enorme intensidad. Dolor. Miedo. Resignación. Posiblemente una mezcla de todo ello. Entonces, apretando su cuerpo con más fuerza contra mi mano, como si no pudiera soportar la idea de irse sola, murió.

He tenido mascotas que han fallecido. Pero aquello fue distinto. Repentino. Brusco. Violento. Con el tiempo, la conmoción desapareció, pero el momento final me acompañó desde entonces. Mi yo racional sabe que atribuyo una significación indebida a un acontecimiento desafortunado por demasiado frecuente. Con todo, la transición de la vida a la muerte de un animal con el que topé de manera fortuita y que murió por mi propia mano, aunque fuese sin quererlo, ejerció sobre mí un extraño influjo. Traía consigo

cierto tipo de verdad. No una verdad proposicional. No una cuestión basada en hechos. Nada que tuviera sentido medir. Pero en ese momento sentí que algo se desplazaba ligeramente en mi sentido del mundo.

Puedo identificar una pequeña colección de experiencias que, cada una a su manera, me dejaron con una sensación parecida: sostener por primera vez a mi primer hijo, refugiarme en una covacha en las rocas de una colina cercana a San Francisco mientras sobre mi cabeza rugía el temporal, oír a mi hijo cantando un solo en un espectáculo escolar, resolver de repente una ecuación que se me ha resistido durante meses, observar desde la ribera del río Bagmati cómo una familia nepalí realiza el ritual de incineración de un familiar fallecido, esquiar (más bien bajar como pude) por una pista negra en Trondheim y, aún no sé cómo, sobrevivir. Todos tenemos nuestra propia lista. Todos. Son experiencias que secuestran por completo nuestra atención y desencadenan respuestas emocionales que valoramos incluso en ausencia (o quizá a causa de la ausencia) de una descripción del todo racional o lingüística. Lo que es curioso, aunque probablemente común, es que mientras que mis procedimientos de trabajo se basan en su totalidad en el lenguaje, no siento la menor necesidad de explorar aquellas experiencias con palabras. Cuando pienso en ellas, no percibo ninguna falta de comprensión que requiera de clarificación lingüística. Ensanchan mi mundo sin necesidad de interpretación. En esas ocasiones, mi narrador interior sabe que es momento de hacerse a un lado. Una vivencia examinada no tiene por qué ser vivencia articulada por medio del lenguaje.

El arte más sobrecogedor puede inducir estados especiales de la mente y el cuerpo que son comparables a los que producen los acontecimientos del mundo real que más nos afectan, y de manera parecida moldean y estimulan nuestra inmersión en la verdad. La discusión, el análisis y la interpretación pueden matizar después esas experiencias, pero las más potentes no dependen de un intermediario lingüístico. De hecho, incluso en el caso del arte basado en la palabra, son las imágenes y las sensaciones las que, en las experiencias más conmovedoras, dejan la huella más profunda. En la elegante descripción de la poeta Jane Hirshfield: «Cuando un escritor trae al lenguaje una imagen nueva y absolutamente precisa, ensancha lo conocible de la existencia»[19]. El premio Nobel Saul Bellow nos habla también de la singular capacidad del arte para ampliar lo conocible:

> Solo el arte penetra aquello que la soberbia, la pasión, la inteligencia y el hábito erigen por los cuatro costados, las aparentes realidades de este

> mundo. Hay otra realidad, la genuina, que perdemos de vista. Esta otra realidad siempre nos envía señales que sin el arte no podríamos recibir.

Y sin esa otra realidad, comenta Bellow, haciéndose eco de reflexiones de Proust, la existencia queda reducida a «terminología para los fines prácticos a los que falsamente llamamos vida»[20].

La supervivencia depende de recoger información que describa el mundo con precisión. Y el progreso, en el sentido convencional de un mayor control sobre nuestro entorno, requiere una clara comprensión de cómo se integran esos hechos en el funcionamiento de la naturaleza. Esas son las materias primas para realizar fines prácticos. Son la base de lo que llamamos verdad objetiva, que solemos asociar con el conocimiento científico. Sin embargo, por muy amplio que sea ese conocimiento, nunca llegará a proporcionarnos una explicación exhaustiva de la experiencia humana. La verdad artística concierne a una capa distinta, nos narra una historia que corresponde a un nivel superior, una historia que, en palabras de Joseph Conrad, «apela a esa parte de nuestro ser que no depende del saber común», que se dirige, en cambio, «a nuestra capacidad para el placer y el asombro, a nuestro sentido del misterio que nos rodea, a nuestro sentido de la piedad, de la belleza, del dolor; a la sensación latente de fraternidad con toda la creación […] en los sueños, en la felicidad, en la pena, en las aspiraciones, en las ilusiones, en la esperanza, en el temor […] que enlaza a toda la humanidad, a los muertos con los vivos, y a los vivos con quienes aún han de nacer»[21].

Liberado de las cadenas de una verosimilitud rígida y desarrollado a lo largo de milenios, el instinto creativo ha explorado a sus anchas el abanico emocional que señala la visión de Conrad sobre el viaje artístico y nos ha brindado el lenguaje vernáculo con el que la realidad genuina de Bellow nos susurra desde el otro lado. Los escritores, en particular, han construido infinidad de mundos con personajes cuyas vidas ficticias nos ofrecen agudos estudios sobre nuestra propia humanidad. Ulises y su arriesgado viaje de venganza y lealtad, lady Macbeth y las garras de la ambición y la culpa, Holden Caulfield y el irreprimible instinto de rebelión, Atticus Finch y el poder del heroísmo tranquilo pero inquebrantable, Emma Bovary y las tragedias de la relación humana, Dorothy y el serpenteante camino de autodescubrimiento[22]; lo que todas estas obras nos permiten comprender sobre las variedades de la experiencia, sobre las verdades artísticas que despliegan, añade sombras y dimensión a lo que de otro modo no pasaría de ser un tosco bosquejo de la naturaleza humana.

Las piezas visuales y auditivas, en las que el lenguaje no ocupa un lugar central, proporcionan experiencias más impresionistas. Sin embargo, como sus homólogos literarios, si no más, pueden desencadenar esas mismas emociones que, como decía Conrad, se encuentran más allá del saber común. Y es que las voces que habitan en la realidad genuina de Bellow nos hablan de muy diversas maneras. Yo no puedo escuchar el *Totentanz* de Franz Liszt sin sentir una congoja visceral; la Tercera Sinfonía de Brahms suscita en mí un profundo e insatisfecho anhelo; la «Chacona» de Bach es una apoteosis de lo sublime; el final del «Himno a la alegría» de la Novena Sinfonía de Beethoven es para mí y, por supuesto, para casi todo el mundo, una de las expresiones más optimistas que jamás nos haya ofrecido nuestra especie. Uniendo música y letra, el «Hallelujah» de Leonard Cohen alaba la vida imperfecta con incomparable autenticidad; la sencilla y exquisita interpretación por Judy Garland de «Over the rainbow» capta los deseos puros de la juventud; el «Imagine» de John Lennon encarna el poder simple de imaginar lo posible.

Tal como ocurre con los momentos singulares de nuestras vidas, todos podemos recordar obras de la literatura o del cine, de la escultura o de la coreografía, de la pintura o de la música, que de una manera u otra nos han emocionado. A través de esas experiencias cautivadoras, consumimos «megadosis» de cualidades esenciales de la vida humana en este planeta, pero lejos de ser calorías vacías, esos momentos de exaltación nos permiten comprender cosas que de otro modo nos sería difícil o imposible.

El letrista Yip Harburg, autor de muchos clásicos, entre ellos «Over the rainbow», lo expresó de una forma sencilla: «Las palabras nos hacen pensar un pensamiento, y la música, sentir un sentimiento. Una canción nos hace sentir un pensamiento»[23]. Sentir un pensamiento. Eso, para mí, capta la esencia de la verdad artística. Tal como recalca Harburg, pensar es intelectual, sentir es emocional, pero «sentir un pensamiento es un proceso artístico»[24]. Es una observación que descansa en el vínculo entre el lenguaje y la música, pero que realmente se refiere a las artes en general. Las respuestas emocionales que suscita el arte reverberan en la imparable corriente de pensamientos que subyace a la conciencia. En el caso de las obras sin palabras, las experiencias son menos directas, y los sentimientos, más libres. Pero todo arte posee la capacidad de hacernos sentir pensamientos y de producir una forma de verdad que difícilmente podríamos esperar de una deliberación consciente o de un análisis factual. Una forma de verdad que con

certeza se sitúa más allá del saber común. Más allá de la razón pura. Fuera del alcance de la lógica. Sin necesidad de demostración.

Pero no nos equivoquemos. Todos «somos» sacos de partículas, cuerpo y mente igual, y los hechos físicos que conciernen a las partículas afectan de manera directa a su forma de interactuar y de comportarse. Pero esos hechos, la narración al nivel de las partículas, solo arroja una luz monocroma sobre las vivamente coloreadas historias que hablan de cómo nos las arreglamos los humanos para movernos por los complejos mundos del pensamiento, la percepción y la emoción. Y cuando nuestras percepciones mezclan pensamiento y emoción, cuando sentimos pensamientos además de pensarlos, nuestra experiencia da un paso fuera de los límites de la explicación mecanicista. Se nos abre una puerta a mundos que de otros modos nos serían desconocidos, algo que, como bien decía Proust, debemos celebrar, pues solo a través del arte podemos penetrar en el universo secreto del otro, y ese es el único viaje en el que no podemos navegar con la ayuda de «métodos dirigidos y conscientes»[25].

Aunque centrada en las artes, la perspectiva de Proust halla eco en mi propia perspectiva sobre la física moderna, que hace tiempo que vengo defendiendo. «El verdadero viaje de descubrimiento —dijo Proust en cierta ocasión— no consiste en buscar nuevos paisajes, sino en poseer nuevos ojos, en ver el universo a través de los ojos de otra persona, o de cientos de personas»[26]. Durante siglos, los físicos hemos utilizado la matemática y los experimentos para remodelar nuestros ojos, para revelar capas de la realidad desconocidas para generaciones anteriores, para ver paisajes familiares de una forma nueva y sorprendente. Con estas herramientas, hemos descubierto las tierras más extrañas gracias a un examen atento de los mismos territorios que siempre hemos habitado. En cualquier caso, para adquirir ese conocimiento y, en general, utilizar el poder de la ciencia, debemos seguir la inviolable directriz que nos conmina a mirar más allá de las peculiaridades de cómo cada una de nuestras distintas colecciones de moléculas y células absorbe el mundo, y centrarnos en cambio en las cualidades objetivas de la realidad. Para todo lo demás, para todas esas verdades tan humanas, nuestras historias encajadas dependen del arte. En palabras de George Bernard Shaw: «Del mismo modo que un espejo nos permite vernos el rostro, las obras de arte nos permiten vernos el alma»[27].

Inmortalidad poética

Con cierta frecuencia se me pregunta cuál es el hecho singular del universo que me parece más alucinante. No tengo una respuesta fija. A veces sugiero la maleabilidad del tiempo en la relatividad. Otras veces, el entrelazamiento cuántico, lo que Einstein llamó «acción fantasmal a distancia». Pero en ocasiones me decanto por lo simple y sugiero algo que la mayoría conocemos desde la escuela. Cuando miramos el firmamento nocturno vemos las estrellas tal como eran hace muchos miles de años. Con la ayuda de potentes telescopios, observamos objetos astronómicos mucho más lejanos tal como eran hace millones o miles de millones de años. Algunas de esas fuentes astronómicas tal vez hayan desaparecido desde entonces, pero las seguimos viendo porque la luz que emitieron hace mucho tiempo siguen en tránsito. La luz nos proporciona una ilusión de presencia. Y no solo para las estrellas. Imperturbables, los rayos de luz reflejados en nosotros llevan nuestra huella a través de una extensión arbitraria del espacio y el tiempo, una inmortalidad poética que atraviesa el cosmos a la velocidad de la luz.

Aquí en la Tierra, la inmortalidad poética adopta una forma distinta. El anhelo por aferrarnos a la vida el tiempo que queramos no se ha visto satisfecho hasta el momento, y quizá nunca lo haga. Pero la mente creativa, capaz de viajar libre por mundos imaginarios, puede explorar lo inmortal, deambular por toda la eternidad y meditar sobre por qué hemos de buscar o desdeñar o temer un tiempo inacabable. Así lo han hecho los artistas desde hace miles de años. Hace unos veinticinco siglos, la poeta lírica griega Safo se lamentaba de lo inevitable del cambio: «Vosotras, muchachas, junto a las Musas de fragante seno los bellos regalos procurad, / y la armoniosa lira que gusta del canto; / pues a mí, que alguna vez antes tuve la piel tersa, la vejez / ya me atrapó», pero atempera su lamento refiriéndose al mito aleccionador de Titono, un mortal a quien los dioses conceden la inmortalidad pero que sigue sujeto a los estragos de la vejez, que ahora tiene que soportar durante toda la eternidad. Una última línea, que algunos eruditos consideran el verdadero final del poema («Eros me ha concedido la belleza y el fulgor del sol»), sugiere que con su apasionada búsqueda de la vida, expresada por medio de su poesía, Safo esperaba trascender la decadencia y lograr un brillo intemporal: a través de su poesía imaginaba alcanzar una inmortalidad simbólica[28].

Es esta una versión de una estrategia de negación de la muerte por la que los mortales buscan pervivir a través de sus actos heroicos, sus aportaciones influyentes o sus obras creativas. La escala de esta inmortalidad requiere un ajuste antropocéntrico, de la eternidad a lo que dure la civilización, lo cual supone un coste no menor, pero que es compensado por el reconocimiento de que, a diferencia de su equivalente literal, la versión simbólica de la inmortalidad es real. La única cuestión es táctica. ¿Qué vidas serán recordadas? ¿Qué obras perdurarán? ¿Cómo podemos asegurarnos de que las nuestras se encuentren entre ellas?

Un par de milenios después de Safo, Shakespeare meditó sobre el papel del arte y el artista en la decisión de lo que el mundo recordará. Aborda este tema en un epitafio que imagina que compone, y observa: «Cuando los que hoy respiran estén ya todos muertos / vos aún viviréis, tal virtud tiene mi pluma», un beneficio, afirma Shakespeare, del que él mismo no podría gozar: «Desde entonces tendrá vuestro nombre vida inmortal, / pero yo, cuando me vaya, moriré para el mundo». Por supuesto, a Shakespeare se le ve el truco: ya que son las palabras del poeta las que serán leídas y recitadas, el sujeto del epitafio no es más que un vehículo para que el poeta alcance la inmortalidad, aunque sea simbólica. Y, en efecto, siglos más tarde, es Shakespeare quien pervive.

Tras abandonar el Círculo de Viena de Freud, Otto Rank desarrolló la tesis de que perseguir la inmortalidad simbólica es uno de los motores primarios del comportamiento humano. En opinión de Rank, el impulso artístico refleja cómo la mente toma las riendas de su destino, cómo muestra el coraje para rehacer la realidad y se embarca en un proyecto para toda la vida dirigido a remodelar su propio yo idiosincrásico. El artista recobra la salud psíquica aceptando la mortalidad (vamos a morir, no hay más, hay que aceptarlo), y desplazando su anhelo de inmortalidad hacia una forma simbólica a través de sus obras creativas. Esta perspectiva nos presenta bajo una nueva luz la imagen tópica del artista torturado. Para Rank, sobrellevar la mortalidad gracias al arte es el camino a la cordura. O, en una descripción parecida del escritor y crítico Joseph Wood Krutch:

> El hombre necesita la eternidad, como atestigua la historia entera de sus aspiraciones; pero la eternidad del arte es, con toda probabilidad, la única que conseguirá[29].

¿Es posible que esta dinámica ya se produjese hace decenas de miles de años y nos ayude a comprender por qué gastábamos energía en actividades que caían fuera de las necesidades inmediatas de refugio y alimento? ¿Puede explicar por qué, a lo largo de los milenios, el afán artístico ha formado parte de la urdimbre de todas las culturas humanas? Sí y sí. Tanto si la ambiciosa visión de Rank da en el clavo como si no, podemos imaginar cómo percibían nuestros antepasados remotos su propia naturaleza mortal, cómo anhelaban aferrarse a su mundo y dejaban su huella en él con algo icónico, algo de su propia mano, algo duradero. Podemos imaginar cómo ese anhelo desviaba su concentración de la supervivencia, por lo demás diligente, y cómo, con el tiempo, se reforzaba y refinaba gracias al placer que sentían otros al unirse al artista en mundos imaginarios nacidos de la mente humana.

Aunque la parquedad de indicios empíricos reduce los análisis de nuestro pasado lejano a un trabajo de conjetura bien informada, en la era moderna podemos encontrar multitud de obras que reflexionan en profundidad sobre la mortalidad y la eternidad[30]. Walt Whitman ponderó lo intolerable de aceptar que con la muerte llegue el fin:

> ¿Recelas la muerte? Si yo recelase la muerte moriría ahora.
> ¿Crees que caminaría con agrado y bien dispuesto hacia la
> aniquilación? […]
> ¡Juro que creo que no existe nada más que la inmortalidad!

Para William Butler Yeats, la antigua ciudad de Bizancio era el destino donde podría despojarse de su forma física mortal, liberarse de toda preocupación humana y obtener el permiso para entrar en un reino intemporal: «Consumid mi corazón; enfermo de deseo / y atado a un animal agonizante, / no recuerda quién es; y llevadme / al artificio de la eternidad»[31]. Herman Melville nos hizo saber que la mortalidad navega a nuestro lado incluso cuando la tempestad parece haber amainado:

> Todos nacemos con una soga al cuello, pero solo cuando nos vemos atrapados en el rápido y repentino giro hacia la muerte comprendemos los mortales, los callados, sutiles y siempre presentes peligros de la vida[32].

Edgar Allan Poe llevó la negación de la muerte a un extremo literario al dar voz a víctimas de los entierros prematuros que luchan por eludir el más íntimo

abrazo de la muerte:

> Me estremecí de terror. Hundí las uñas en los muslos hasta lastimarme, y el ataúd quedó empapado con mi propia sangre. Al rascar la madera de los costados de mi prisión con el mismo empeño maníaco, me laceré los dedos, gasté las uñas hasta la carne, y pronto quedé rendido e inmóvil[33].

Tennessee Williams, a través del patriarca de ficción Big Daddy Pollitt, nos hace ver que «la ignorancia (de la mortalidad) es cómoda. Pero el hombre no goza de esa comodidad, es el único ser vivo que concibe la muerte», y, en consecuencia, «si tiene dinero compra y compra y compra, y creo que la razón de que compre todo lo que puede es que en el fondo de su cabeza alberga la absurda esperanza de que una de sus compras ¡será la vida eterna!»[34].

Dostoyevski, a través de su personaje Arkadi Svidrigáilov, difundió una perspectiva diferente, harto de la reverencia que despierta la eternidad:

> La eternidad se nos presenta siempre como una idea que no podemos aprehender, como algo enorme, ¡enorme! ¿Por qué tiene que ser enorme? Imagina por un momento una pequeña habitación, como la de una casa de baños del campo, sucia, con telarañas en las esquinas, y que eso es toda la eternidad. ¿Sabes que a veces me la imagino así?[35].

Es un sentimiento que también expresa Sylvia Plath, «¡Oh, Dios, no soy como tú / en tu vacua negrura / innumerables estrellas, estúpido confeti brillante. / La eternidad me aburre, nunca la he querido»[36], y que deja volar ligero Douglas Adams por medio de un personaje inmortal por accidente, Wowbagger el Infinitamente Prolongado, que planea aliviar su profundo aburrimiento insultando sistemáticamente a todos los habitantes del universo, uno a uno, en orden alfabético[37].

Este abanico de sentimientos, del anhelo al desdén, pone de manifiesto que nuestro reconocimiento del limitado tiempo que nos es concedido ha promovido una relación artísticamente vigorosa con el concepto de eternidad. La vida examinada examina la muerte. Y para algunos, examinar la muerte es soltar la imaginación para que desafíe su dominio, dispute su eminencia y conciba mundos más allá de su alcance. Por mucho que los investigadores discutan sobre su utilidad evolutiva, su papel en la construcción de la cohesión social, su necesidad de pensamiento innovador y su posición en el

panteón de los anhelos primigenios, las artes nos ofrecen el medio más evocador para dar expresión a las cosas que más nos importan, como la vida y la muerte, como lo finito y lo infinito.

Para muchos, entre los que me cuento, la expresión más intensa es la que nos da la música, que puede ofrecernos una inmersión tan envolvente que, por unos breves instantes, parece que hemos salido fuera del tiempo. El violoncelista y director de orquesta Pablo Casals describió el poder de la música para «informar las actividades ordinarias con fervor espiritual, dar alas de eternidad a lo que es más efímero»[38]. Es un fervor que nos hace sentir parte de algo más grande, algo que visceralmente afirma la «invencible convicción de solidaridad que enlaza la soledad de innumerables corazones»[39], como decía Conrad. Ya sea con el compositor o con otros de la audiencia, o de alguna otra forma más abstracta de comunión, la música invita a la conexión. Y es a través de esa relación como la experiencia de la música trasciende el tiempo.

A finales de la década de 1960, a los alumnos de tercer curso de primaria de la clase del señor Gerber, de la escuela pública 87 de Manhattan, nos pusieron de deberes que entrevistásemos al adulto que quisiéramos y escribiésemos una breve redacción acerca de su ocupación. Yo no me compliqué la vida y entrevisté a mi padre, un compositor e intérprete que gustaba de citar su titulación académica abreviada: SPhD (por el inglés, alumno que abandonó los estudios en Seward Park High School[40]). Mediado el cuarto curso de secundaria, mi padre dejó los libros, cogió las maletas y se marchó a cantar, tocar e interpretar por todo el país. Ha pasado más de medio siglo desde aquel ejercicio de tercero de primaria, pero dijo entonces algo que nunca me ha abandonado. Cuando le pregunté por qué había escogido la música, mi padre respondió: «Para ahuyentar la soledad». Enseguida adoptó un tono más alegre, como correspondía a una redacción de tercer curso, pero aquel momento sin censura fue revelador. La música era su salvavidas. Era su versión de la solidaridad de Conrad.

Son pocos los compositores que consiguen emocionar al mundo. Mi padre no fue uno de ellos, y esa es una realidad que le costó tiempo aceptar. Las melodías y ritmos escritos a mano en cientos de manuscritos amarillentos, muchos de ellos anteriores a mi nacimiento, tienen ahora poco interés si no es para la familia. Yo quizá sea la única persona que de vez en cuando escucha todavía las baladas, canciones y obras para piano que compuso desde los años cuarenta o cincuenta. Para mí, son un tesoro, una conexión que me permite

sentir los pensamientos de mi padre en la época en que comenzaba a abrirse un camino en el mundo.

La música tiene el notable poder de crear esa profunda conexión incluso entre quienes no están enlazados por vínculos familiares, viven en tiempos distintos, habitan en lugares diferentes. Una descripción conmovedora nos la ofrece Helen Keller, a quien debemos incluir entre los héroes singulares de la historia. El 1 de febrero de 1924, la emisora de radio WEAF de la ciudad de Nueva York emitió en directo la Novena Sinfonía de Beethoven interpretada por la Orquesta Sinfónica de Nueva York. Desde su casa, Helen Keller posó sus manos sobre el diafragma de un altavoz de radio destapado y, a través de las vibraciones, pudo sentir la música, experimentar lo que calificó de «sinfonía inmortal», llegando incluso a distinguir algunos de los instrumentos:

> Cuando las voces humanas emergían vibrando de la creciente armonía, las reconocí de inmediato como voces. Sentí cómo el coro se tornaba cada vez más exultante, más extático; cómo se alzaban ágiles como llamas, hasta que casi se me para el corazón.

Y entonces, escuchando sonidos que conmueven el espíritu, música que reverbera en el eternidad, concluye:

> Mientras escuchaba, mientras la oscuridad y la melodía, la negrura y el sonido llenaban la estancia, no pude sino recordar que el gran compositor de quien brotó para todo el mundo aquel caudal de dulzura, era sordo como yo. Me estremeció el poder de aquel implacable espíritu que, superando su dolor, producía tal gozo en otros. Y así permanecí, sintiendo con mi mano la magnífica sinfonía que rompía como un mar contra las mudas orillas de su alma y la mía[41].

9

DURACIÓN E IMPERMANENCIA

De lo sublime al pensamiento final

Cada cultura posee una noción de lo atemporal, una representación venerada de la permanencia. Almas inmortales, historias sagradas, dioses ilimitados, leyes eternas, arte trascendente, teoremas matemáticos. Sin embargo, a través de ese abanico que va de lo sobrenatural a lo puramente abstracto, la permanencia es algo que los humanos codiciamos pero nunca conseguimos. Aquellos momentos en que más nos acercamos, quizá porque nos hemos despojado del sentido del tiempo gracias a un encuentro eufórico o trágico, o inducidos por la meditación, o con la ayuda de la química o mediante una vivencia religiosa o artística, pueden proporcionarnos las experiencias más formativas de la vida.

Hace décadas, junto con ocho adolescentes más, participé en un curso de supervivencia en los remotos bosques de Vermont. Una noche, cuando ya todos dormíamos en nuestras tiendas, los instructores nos despertaron a gritos, ordenándonos que nos levantásemos y nos vistiésemos a toda prisa. Emprendimos una improvisada caminata nocturna. Cogidos de la mano y marchando en fila india en la oscuridad, atravesamos lentamente frondosos bosques, densos matorrales y, para nuestro deleite, un pantano en el que el lodo nos alcanzaba la cintura. Empapados, ateridos y cubiertos de barro, llegamos por fin a un claro donde nos informaron de que los nueve participantes pasaríamos el resto de la noche sin nada más que tres sacos de dormir. Conscientes de la futilidad de nuestras protestas, por encendidas que fuesen, juntamos los tres sacos de dormir por las cremalleras, nos quitamos la ropa y nos arrimamos muy juntos bajo aquel improvisado edredón. Una brillante aurora boreal iluminaba el cielo. Nunca había visto nada igual. Las

sábanas de luz que se mecían, los espectaculares colores que se difuminaban y entremezclaban, todo contra un firmamento de infinitas estrellas. De repente estaba en un lugar distinto. La excursión, el pantano, el frío, el contacto con otros cuerpos casi desnudos, todo me llevaba a tiempos remotos. Hombre, naturaleza, universo. Llevaba barro encima, pero estaba envuelto en una danza de luces, abandonado por el último calor del grupo, absorto en las lejanas estrellas. No sé cuánto tiempo estuve mirando el cielo antes de que me venciera el sueño. Minutos, horas. Qué importaba. Por un breve momento, el tiempo se había desvanecido.

Los episodios con esta cualidad atemporal no son frecuentes. Y son efímeros. El tiempo, por lo general, es un compañero inseparable. La impermanencia subyace a la experiencia. Veneramos lo absoluto, pero vivimos atados a lo transitorio. Incluso las características del cosmos que se nos presentan como duraderas, como la extensión del espacio, las galaxias remotas, la sustancia de que está hecha la materia, todo ello yace dentro de los dominios del tiempo. Como veremos en este capítulo y el siguiente, el universo y todo lo que contiene es, por estable que nos parezca, mutable y precario.

Evolución, entropía y futuro

Bajo la sólida fachada de la realidad, la ciencia ha desvelado un incesante drama de agitadas partículas en el que resulta tentador ver la evolución y la entropía como dos personajes en perpetuo conflicto, luchando por el control. En esta concepción, la evolución construye estructura, y la entropía la destruye. Parece un relato bien trabado; el problema, como hemos visto en capítulos anteriores, es que no es del todo cierto. Como tantos esbozos simplificados, hay algo de verdad en él. La evolución «es» esencial para construir estructuras. Y la entropía «tiende» a degradar las estructuras. Pero entropía y evolución no tienen por qué tirar en direcciones opuestas. El paso a dos de la entropía permite que florezca estructura aquí, siempre y cuando se expulse entropía allá. La vida, que se cuenta entre los principales logros de la evolución, encarna este mecanismo al consumir energía de alta calidad que utiliza para mantener y mejorar sus configuraciones ordenadas, al tiempo que expulsa hacia su entorno desechos de alta entropía. A lo largo de miles de

millones de años, el intercambio cooperativo entre entropía y evolución ha dado origen a ordenaciones particulares que son exquisitas, entre ellas una vida y una mente capaces de producir la Novena Sinfonía y muchísimas otras vidas y mentes que pueden experimentarla como algo sublime.

Llegados a este punto del viaje que nos ha llevado del Big Bang a Beethoven, ahora que encaramos el futuro, ¿seguiremos viendo la evolución y la entropía como los factores decisivos que guían el cambio? En lo que atañe a la evolución darwiniana, uno podría pensar que no[1]. La dependencia del éxito reproductor en la genética es la razón de que la selección darwiniana haya estado tanto tiempo al timón del barco evolutivo. Una diferencia de suma importancia en nuestros tiempos es la intervención de la medicina moderna y de las protecciones que, en términos más generales, nos proporciona la civilización. Genotipos que habrían tenido dificultades para sobrevivir a los desafíos de la sabana africana de tiempos remotos subsisten hoy sin mayores problemas en la ciudad de Nueva York. En muchas partes del mundo, nuestro perfil genético ya no es el principal factor que dicta quién muere durante la infancia y quién produce descendencia abundante en la edad adulta. Naturalmente, al nivelar algunas partes del campo de juego de la genética, los avances modernos alteran las anteriores presiones selectivas y, en consecuencia, ejercen su propia forma de influencia evolutiva. Los investigadores también señalan numerosas presiones que imprimen tendencias en el acervo genético, entre ellas elecciones de dieta (por ejemplo, las dietas ricas en productos lácteos favorecen sistemas digestivos en los que la producción de lactasa se prolonga más allá de la infancia), condiciones ambientales (vivir a gran altitud confiere una ventaja a las adaptaciones que mejoran la supervivencia con menos oxígeno) y preferencias de pareja (en algunos países la estatura media podría estar evolucionando hacia alturas que las personas reproductivamente activas consideran más atractivas[2]). El mayor de los impactos podría provenir de la recién hallada capacidad de editar directamente los perfiles genéticos. Ciertas técnicas que se están desarrollando con gran rapidez nos ofrecen la posibilidad de aumentar los mecanismos de variación genética, mutación aleatoria y recombinación sexual para añadir a la lista el diseño voluntario. Si un investigador descubriera una reconfiguración genética que alargase la vida humana hasta los doscientos años con efectos secundarios que incluyesen piel cianótica, tres metros de estatura y una libido desmedida centrada en otros individuos azules, seríamos testigos del pleno apogeo de la evolución manifiesta en la rápida expansión de quienes eligiesen convertirse en humanos longevos al estilo de los Na’vi de

Avatar. Solo podemos conjeturar hacia dónde nos llevará todo el potencial de remodelar completamente la vida y quizá diseñar una nueva versión de la sintiencia, sea biológica, artificial o híbrida, cuyos poderes podrían empequeñecer nuestras habilidades actuales.

En cuanto a la entropía, la respuesta a la pregunta sobre su futura relevancia constituye un enfático sí. Varios capítulos atrás vimos que la segunda ley de la termodinámica es una consecuencia general de la aplicación de razonamientos estadísticos a las leyes físicas subyacentes. ¿Es posible que en el futuro se produzcan descubrimientos que nos hagan revisar leyes que hoy consideramos fundamentales? Casi seguro. ¿Conservarán la entropía y la segunda ley de la termodinámica la prominencia por su capacidad explicativa? Casi seguro que también. Durante la transición del marco clásico al marco radicalmente diferente de la física cuántica, hubo que actualizar las matemáticas que describen la entropía y la segunda ley, pero como estos conceptos surgen de los razonamientos probabilísticos básicos, siguen siendo igual de válidos. Lo mismo cabe esperar que ocurra con respecto a avances futuros en nuestra comprensión de las leyes físicas. No es que no podamos imaginar leyes físicas que reduzcan a la irrelevancia la entropía y la segunda ley; lo que ocurre es que esas leyes tendrían que ser tan contrarias a las características de la realidad, inherentes a todo lo que conocemos y todo lo que hemos medido, que la mayoría de los físicos descartan esa posibilidad sin más trámite.

Al imaginar el futuro, la mayor incertidumbre es la que envuelve al control que podamos ejercer nosotros, o alguna inteligencia futura, sobre nuestro entorno. ¿Es posible que una vida inteligente pueda dirigir el destino a largo plazo de estrellas, galaxias e incluso de todo el cosmos? ¿Podría esa inteligencia alterar a voluntad la entropía a escalas inimaginables, reduciéndola en grandes extensiones del espacio mediante una versión a escala cósmica del paso a dos de la entropía? ¿Podría incluso poseer esa inteligencia la capacidad de diseñar y crear universos enteros? Por extravagantes que nos parezcan estas posibilidades, caen dentro de lo posible. El dilema para nosotros es que su impacto sobre el futuro se encuentra claramente más allá de nuestra capacidad de predicción. Incluso en un mundo regido por leyes, donde no hay lugar para el libre albedrío en el sentido tradicional, el amplio repertorio comportamental de la inteligencia (la versión de libertad que adquiere la inteligencia) hace que ciertas variedades de predicción sean, en esencia, imposibles. No cabe duda de que en el futuro el pensamiento dispondrá de métodos y técnicas computacionales

incomparables, pero sospecho que predecir a largo plazo todo lo que dependa íntimamente de la vida y la inteligencia seguirá fuera de nuestro alcance.

¿Cómo debemos proceder entonces?

De aquí en adelante, supondremos que las leyes de la física tal como las conocemos hoy, actuando de la forma no dirigida en que presuntamente han actuado desde el Big Bang, seguirán siendo la influencia dominante que guiará el despliegue del cosmos. No consideraremos la posibilidad de que puedan cambiar las propias leyes o las «constantes» numéricas de la naturaleza, ni tampoco la de que estas ya estén cambiando a un ritmo lento, unas modificaciones que en la actualidad podrían ser demasiado pequeñas como para dejar huella, pero que podrían existir y tener un efecto acumulado sustancial a una escala de tiempo extraordinariamente larga[3]. Tampoco tomaremos en consideración la posibilidad de que el dominio sobre el que una inteligencia futura ejerza un control estructural pueda hincharse hasta abarcar las escalas de las galaxias y aún mayores. Eso, desde luego, es un buen número de «nos» y «tampocos». Pero a falta de indicios que nos guíen, investigar esas posibilidades sería como disparar a ciegas. Si al lector le parece que estas suposiciones rompen con sus expectativas sobre el futuro, puede ver lo que explico en este y el siguiente capítulo como un reflejo de lo que ocurriría en el cosmos si no se produjesen esos cambios o intervenciones inteligentes. Aunque sin duda relevantes para los detalles del relato que aquí se expone, sospecho que la claridad que nos aportarán descubrimientos futuros y las influencias ejercidas por la inteligencia en el futuro no nos obligarán a reescribir por entero el despliegue cósmico que aquí exploramos[4]. Esta puede que sea una suposición osada, pero también es la ruta más rápida para avanzar, y la que a continuación emprenderemos de manera valiente[5].

Tal como pondrán de manifiesto las páginas que siguen, el propio hecho de que podamos hilvanar un relato coherente, aunque provisional, del despliegue del cosmos hasta un tiempo exponencialmente lejano en el futuro es un logro extraordinario; un logro que hoy es posible gracias a las aportaciones de muchos, y que es tan emblemático del anhelo humano por la coherencia como las más preciadas historias, mitos, religiones y creaciones artísticas de nuestra especie.

Un imperio de tiempo

¿Cómo debemos organizar nuestra argumentación sobre el futuro? La intuición humana está razonablemente bien dotada para comprender las escalas de tiempo de la experiencia común, pero para analizar las épocas cosmológicas clave del futuro tendremos que enfrentarnos a unos períodos temporales tan vastos que ni siquiera las mejores analogías pueden proporcionarnos más que una vaga idea de su duración. Aun así, no hay nada como las analogías basadas en la experiencia cotidiana para hacerse una idea mental de las alturas temporales a las que tendremos que ascender. Imaginemos, pues, que la línea temporal del universo se extiende hacia lo más alto del Empire State Building, pero de tal manera que cada altura equivalga a una duración diez veces mayor que la planta inferior. Así, el primer piso representa los diez primeros años que siguieron al Big Bang; el segundo, los cien primeros años; el tercero, los mil primeros años, y así sucesivamente. Como se ve, las duraciones crecen con rapidez a medida que ascendemos plantas, algo que es fácil de decir, pero fácil también de malinterpretar. Subir, por ejemplo, del piso 12 al piso 13 equivale a considerar el universo desde un billón de años después del Big Bang hasta diez billones de años después de la gran explosión. Por consiguiente, al ascender esa primera planta transcurren nueve billones de años, una duración que empequeñece enormemente el tiempo representado por todos los pisos inferiores. La misma pauta se mantiene a medida que ascendemos: la duración representada por cada nueva planta es mucho mayor, exponencialmente mayor, que la duración representada por los pisos inferiores.

Si suponemos, redondeando, que la duración de una vida humana es de cien años, que los imperios duraderos persisten unos mil años, que las especies más resistentes permanecen unos pocos millones de años, los pisos del Empire State Building nos parecerán, a medida que ascendemos, que representan duraciones a otra escala, eones de tiempo. Cuando alcanzamos el observatorio del rascacielos, en el piso 86, estaremos a 10^{86} años (100 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000) del Big Bang, una escala de tiempo vertiginosa que se alza por encima de la duración de cualquier empresa humana. Pero a pesar de todos esos ceros, cuando a continuación ascendemos al punto más alto del edificio, en el piso 102, la duración representada por el

observatorio nos parecerá, en comparación, poco más que el grosor de la pintura que cubre ese último trecho.

En la actualidad han pasado unos 13 800 millones de años desde el Big Bang, lo que significa que todos lo que hemos discutido en capítulos anteriores ocurrió entre la planta baja del Empire State Building y unos pocos pasos por encima del piso 10. A partir de aquí, ascenderemos exponencialmente hacia el futuro.

Comencemos.

El sol negro

Nuestros primeros antepasados, aun sin entender que el Sol baña la Tierra con una lluvia continua de energía de baja entropía esencial para la vida, reconocían la enorme importancia de aquel ojo que los vigilaba desde lo alto, una presencia abrasadora que presenciaba los ires y venires de su cotidiana existencia. Cuando el Sol se ponía, sabían que volvería a salir, cumpliendo con la pauta más conspicua y fiable de nuestro mundo. La misma confianza con la que podemos afirmar que un día ese ritmo llegará a su fin.

Durante casi cinco mil millones de años, el Sol ha soportado su ingente masa contra la aplastante fuerza de la gravedad gracias a la energía que produce en su interior la fusión de núcleos de oxígeno. Esa energía alimenta un entorno de frenéticas y veloces partículas que ejercen una fuerte presión hacia fuera. De manera parecida a la bomba de aire que infla los castillos hinchables de los niños, la presión producida por la fusión en el núcleo del Sol infla nuestra estrella e impide que se colapse bajo su enorme peso. Este empate entre la gravedad, que tira hacia dentro, y las partículas, que empujan hacia fuera, se mantendrá firme durante unos cinco mil millones de años más. Entonces se romperá el equilibrio. Aunque el Sol todavía estará repleto de núcleos de hidrógeno, escasearán en el núcleo de la estrella. La fusión de hidrógeno produce helio, que son núcleos más pesados y densos que los del hidrógeno, y del mismo modo que la arena tirada a un estanque desplaza el agua a medida que llena el fondo, el helio desplaza el hidrógeno a medida que llena el centro del Sol.

Y eso tiene consecuencias.

El centro del Sol es donde las temperaturas son más altas, de unos quince millones de grados en la actualidad, muy por encima de los diez millones de grados que se necesitan para fusionar hidrógeno en helio. Sin embargo, para fusionar núcleos de helio hace falta una temperatura de unos cien millones de grados. Como la temperatura del Sol ni se acerca a ese umbral, a medida que el helio desplaza el hidrógeno en el núcleo, el suministro de combustible para la fusión se va agotando. En consecuencia se irá reduciendo la presión hacia fuera que ejerce la producción de energía en el núcleo y el tirón hacia dentro de la gravedad comenzará a ganar la partida. El Sol iniciará entonces una implosión, y a media que su imponente peso se colapse hacia el interior, su temperatura se disparará. El intenso calor y la fuerte presión, todavía lejos de las condiciones necesarias para que se inicie la fusión del helio, desencadenarán una nueva ronda de fusión, esta vez en la fina corteza de núcleos de hidrógeno que envolverá el núcleo estelar, constituido en su mayor parte por helio. En esas condiciones tan extremas, la fusión de hidrógeno procederá a un ritmo extraordinario, produciendo un empuje hacia fuera más intenso que el que nunca ha experimentado el Sol, y que no solo frenará la implosión, sino que hará que nuestra estrella se hinche enormemente.

El destino de los planetas interiores depende del equilibrio entre dos factores. ¿Cuánto crecerá el Sol? Y, a medida que lo haga, ¿de cuánta masa se despojará? Esta última cuestión es relevante porque, con su motor nuclear funcionando a toda máquina, saldrán disparadas al espacio exterior un gran número de las partículas de la capa más externa del Sol. Y si la estrella reduce su masa, aflojará también el tirón gravitatorio, y eso haría que los planetas migrasen a órbitas más alejadas. El futuro de cada planeta dependerá de si su trayectoria de alejamiento le permite escapar al aumento de tamaño del Sol.

Las simulaciones numéricas con modelos solares detallados indican que Mercurio perderá la carrera; será engullido por el hinchado Sol y en poco tiempo quedará vaporizado. Marte, que tiene su órbita a mayor distancia, juega con ventaja y se salva. Venus seguramente sucumbe, aunque algunas simulaciones indican que el Sol al hincharse no llegará por poco a alcanzar su órbita en recesión y, de ser así, tampoco la de la Tierra[6]. Pero aunque la Tierra se salve, las condiciones ambientales de nuestro planeta cambiarán profundamente. Su temperatura superficial se disparará hasta miles de grados, de sobra para secar los océanos, expulsar la atmósfera e inundar la superficie con lava fundida. Unas condiciones sin duda desagradables, pero el gigante rojo que entonces será el Sol ofrecerá un espectáculo imponente en el cielo, aunque es casi seguro que no habrá nadie para presenciarlo. Si nuestros

descendientes todavía perduran (si han conseguido eludir la autodestrucción, los patógenos letales, los desastres ambientales, los asteroides mortíferos y las invasiones alienígenas, entre otras posibles catástrofes), y si intentan seguir haciéndolo, habrán abandonado mucho antes la Tierra en busca de un hogar más acogedor.

A medida que se fusionen los núcleos de hidrógeno que rodean el centro de helio del Sol, el helio producido caerá hacia el interior, forzará al núcleo de la estrella a contraerse más y aumentar todavía más su temperatura. A su vez, este calor más elevado acelerará el ciclo, puesto que incrementará la tasa de fusión de hidrógeno en la capa que envuelve el núcleo, intensificará la tormenta de helio que llueve sobre el núcleo solar y disparará todavía más su temperatura. Aproximadamente 5.5000 millones de años desde el presente, la temperatura del núcleo del Sol alcanzará por fin el umbral que permite la combustión de helio, que se fusionará en carbono y oxígeno. Tras una espectacular pero breve erupción que marcará la transición a la fusión de helio como principal fuente de energía, el Sol se encogerá de nuevo y se estabilizará en una configuración menos frenética.

Pero esta recobrada estabilidad será breve. Al cabo de unos cien millones de años, del mismo modo que el helio, más pesado, desplazó antes el hidrógeno, más ligero, ahora el carbono y el oxígeno desplazarán el helio, ocuparán el núcleo solar y obligarán al helio a desplazarse a las capas envolventes. La combustión nuclear de los nuevos constituyentes del núcleo del Sol, el carbono y el oxígeno, requiere temperaturas aún más altas, de por lo menos seiscientos millones de grados. Como la temperatura del núcleo solar estará todavía muy por debajo de este umbral, la fusión nuclear volverá a frenarse, el tirón de la gravedad volverá a dominar y el Sol se contraerá una vez más, aumentando nuevamente la temperatura de su núcleo.

En la fase previa a este ciclo, el aumento de temperatura desencadenaba el inicio de la fusión en una capa de hidrógeno que rodeaba un núcleo inactivo de helio. Ahora, el aumento de la temperatura desencadena la fusión en la capa de helio que rodea el núcleo inactivo de carbono y oxígeno. Pero esta vez la temperatura del núcleo estelar no alcanzará el valor necesario para que vuelva a encenderse la combustión nuclear. La masa del Sol es demasiado pequeña como para que la contracción aumente la temperatura hasta un punto que, en estrellas de mayor masa, encendería la fusión de carbono y oxígeno para formar núcleos atómicos más pesados y complejos. En el Sol, a medida que se consuma el helio en la capa que envuelve el núcleo, el carbono y oxígeno producidos caerán hacia el núcleo, de manera que este seguirá

contrayéndose hasta el momento en que un proceso cuántico (el principio de exclusión de Pauli) frene la implosión[7].

En 1925, el físico austríaco Wolfgang Pauli, un pionero de la mecánica cuántica famoso por su temperamento cáustico («No me molesta que pienses despacio, sino que publiques más rápido de lo que piensas»[8]), se percató de que la mecánica cuántica pone un límite a lo cerca que pueden apretarse dos electrones (de manera más precisa, la mecánica cuántica excluye la posibilidad de que dos partículas de materia idénticas ocupen el mismo estado cuántico, pero la descripción aproximada nos vale). Poco después, varios investigadores demostraron que el resultado de Pauli, pese a centrarse en partículas diminutas, era la clave para entender el destino del Sol y otras estrellas de tamaño parecido. A medida que el Sol se contrae, los electrones del núcleo estelar se empaquetan cada vez más apretadamente, y tarde o temprano alcanzan el límite especificado por los resultados de Pauli. Cuando una mayor contracción ha de violar el principio de Pauli, se manifiesta una potente repulsión cuántica, los electrones se plantan, exigen su espacio personal y se niegan a estar más apretujados. Entonces se frena la contracción del Sol[9].

Lejos del núcleo estelar, las capas más exteriores, que siguen expandiéndose y enfriándose, acaban por perderse en el espacio, dejando a sus espaldas una bola extraordinariamente densa de carbono y oxígeno, una enana blanca que seguirá brillando durante unos cuantos miles de millones de años más. Sin la temperatura necesaria para que se produzca más fusión nuclear, la energía térmica se disipará con lentitud en el espacio y, como el último resplandor de un rescoldo, lo que quede del Sol se irá enfriando y apagando hasta convertirse en un orbe gélido y oscuro. Unos pocos pasos por encima del décimo piso, el Sol se desvanecerá en la negrura.

El gran desgarro

Si lanzamos una manzana hacia lo alto, el implacable tirón de la gravedad de la Tierra hará que su velocidad se frene poco a poco. Es un ejercicio pedestre con profundas implicaciones cosmológicas. Desde las observaciones de Hubble en la década de 1920 sabemos que el espacio se expande: las galaxias se alejan deprisa unas de otras[10]. Pero igual que pasa con la manzana

lanzada al aire, el tirón gravitatorio que ejerce cada galaxia sobre todas las otras debería frenar el éxodo cósmico. El espacio se expande, pero la tasa de expansión debería ir reduciéndose. Motivados por esta expectativa, en la década de 1990 dos equipos de astrónomos se dispusieron a medir la tasa de frenado cósmico. Tras casi una década de esfuerzos, anunciaron sus resultados, y el mundo científico se tambaleó[11]. La expectativa era errónea. Mediante concienzudas observaciones de explosiones de supernovas lejanas, potentes faros que pueden verse y medirse a través de todo el cosmos, descubrieron que la expansión no se está frenando. Se está acelerando. Y no es que este cambio hacia una aceleración haya ocurrido hace dos días. Los investigadores, con gran turbación, tuvieron que vérselas con unas observaciones astronómicas que establecían que la expansión llevaba ya cinco mil millones de años aumentando de velocidad.

Si se esperaba de manera tan general que la tasa de expansión fuese cada vez más lenta es porque eso tenía sentido. Proponer que la expansión aumente de velocidad es, a primera vista, tan absurdo como predecir que una manzana suavemente lanzada al aire salga disparada como un cohete en el momento en que se despega de la mano. Si presenciáramos algo tan extraño, buscaríamos alguna fuerza oculta, alguna influencia que hasta entonces hemos pasado por alto y que es responsable del empuje de la manzana hacia el cielo. Así pues, cuando los datos aportaron indicios abrumadores de que la expansión del espacio se está acelerando, los investigadores, una vez pasado el susto, agarraron un puñado de tizas y se dispusieron a buscar la causa.

La principal explicación se hace eco de una característica crucial de la relatividad general de Einstein que ya encontramos en nuestra discusión sobre la cosmología inflacionaria del capítulo 3.[12] Recordemos que, de acuerdo con Newton y con Einstein, los agregados de materia, como los planetas y las estrellas, ejercen la gravedad atractiva que a todos nos resulta familiar, pero en la teoría de Einstein la gravedad amplía su repertorio. Si una región del espacio no alberga ningún agregado de materia, sino que es ocupada de manera uniforme por un campo de energía (mi imagen preferida, que ya he presentado antes, es la del vapor que llena de manera uniforme el espacio de una sauna), la fuerza gravitatoria resultante es repulsiva. En la cosmología inflacionaria, los investigadores conciben como portador de esa energía una extraña especie de campo (el campo del inflatón), y la teoría propone que su poderosa gravedad repulsiva fue el desencadenante del Big Bang. Eso ocurrió hace casi catorce mil millones de años, pero podemos seguir un enfoque

parecido para explicar la expansión acelerada del espacio que observamos en la actualidad.

Si imaginamos que todo el espacio está uniformemente ocupado por otro campo de energía (al que denominamos «energía oscura», porque no produce luz, aunque «energía invisible» sería un término más apropiado), podemos explicar que las galaxias se apresuren a alejarse. Al ser agregados de materia, ejercen una gravedad atractiva, lo que significa que todas ellas tiran hacia sí y, por consiguiente, frenan el éxodo cósmico. En cambio, la energía oscura, que se halla extendida de manera uniforme, ejerce una gravedad repulsiva: empuja hacia fuera y, por lo tanto, acelera el éxodo cósmico. Para explicar la expansión acelerada que observan los astrónomos, basta con que el empuje de la energía oscura supere el tirón colectivo de las galaxias. Y no en mucho. En comparación con la violenta expansión del espacio durante el Big Bang, la expansión actual es muy leve, y no hace falta más que una suma diminuta de energía oscura. De hecho, en un metro cúbico típico del espacio, la cantidad de energía oscura necesaria para explicar la aceleración galáctica observada mantendría encendida una bombilla de cien vatios durante tan solo unas cinco billonésimas de segundo, un tiempo ridículamente minúsculo[13]. Pero el espacio contiene muchísimos metros cúbicos, así que el empuje repulsivo aportado por cada uno de ellos se une en la producción de una fuerza hacia fuera que consigue alimentar la expansión acelerada que han medido los astrónomos.

Los argumentos a favor de la energía oscura son convincentes, pero circunstanciales. Nadie ha hallado la manera de apresar esa energía oscura, de establecer su existencia, de examinar directamente sus propiedades. No obstante, como explica tan bien las observaciones, la energía oscura se ha convertido en la explicación *de facto* de la expansión acelerada del espacio. Lo que no está tan claro, sin embargo, es el comportamiento a largo plazo de la energía oscura. Y para pronosticar el futuro lejano es esencial considerar todas las posibilidades. El comportamiento más simple que es congruente con todas las observaciones es que el valor de la energía oscura no cambia a lo largo del tiempo cósmico[14]. Pero la simplicidad, aunque preferida conceptualmente, no es por sí misma más verdadera. La descripción matemática de la energía oscura permite que se debilite, lo cual pondría freno a la expansión acelerada, o que se fortalezca, dando más gas a la expansión acelerada. Visto desde el piso 11, esta última posibilidad (que la gravedad repulsiva se haga cada vez más fuerte) es la más desfavorable, pues en ese

caso nos estaríamos precipitando a un violento fin que los físicos denominan Big Rip o «gran desgarro».

Un empuje cada vez más potente de la gravedad repulsiva acabaría triunfando sobre todas las otras fuerzas atractivas, y todo se desgarraría. Nuestro cuerpo se mantiene como un todo gracias a la fuerza electromagnética, que une nuestros constituyentes atómicos y moleculares, pero gracias también a la fuerza nuclear fuerte, que mantiene unidos los protones y neutrones dentro de los núcleos atómicos de nuestro cuerpo. Como estas fuerzas son mucho más potentes que el actual empuje hacia fuera del espacio en expansión, el cuerpo se mantiene íntegro. Pero si la fuerza del empuje repulsivo creciera, el espacio del interior del cuerpo acabaría expandiéndose con tal empuje que ganaría a las fuerzas electromagnética y nuclear fuerte que lo mantienen unido. Así que nos inflaríamos y acabaríamos estallando en pedazos, al igual que todo lo demás.

Los detalles dependen de la tasa de aumento de la gravedad repulsiva, pero en un ejemplo representativo calculado por los físicos Robert Caldwell, Marc Kamionkowski y Nevin Weinberg, de aquí a unos veinte mil millones de años la gravedad repulsiva desgarraría los cúmulos de galaxias; más o menos mil millones de años más tarde las estrellas que constituyen la Vía Láctea saltarían como chispas en un espectáculo de fuegos artificiales; unos sesenta millones de años después, la Tierra y los otros planetas del sistema solar serían lanzados lejos del Sol; unos meses más tarde, la fuerza gravitatoria repulsiva entre las moléculas haría explorar las estrellas y los planetas; y tan solo treinta minutos más tarde, la repulsión entre las partículas que constituyen los átomos individuales habría cobrado tal fuerza que también estos explotarían[15]. El estado final del universo depende de la naturaleza cuántica del espacio y el tiempo, que todavía desconocemos. En términos muy generales, que de momento carecen de rigor matemático, existe la posibilidad de que la gravedad repulsiva haga trizas el propio tejido del espacio-tiempo. La realidad comenzó con una explosión, y en algún momento, antes de que alcancemos el piso 11, podría acabar con un desgarro.

Aunque las observaciones actuales no permiten descartar que la energía oscura cobre fuerza, muchos otros físicos y yo creemos que es improbable. Cuando estudio las ecuaciones, me quedo con la sensación de que, en efecto, la matemática cuadra, aunque por los pelos, pero las ecuaciones no me resultan naturales ni convincentes. Sin embargo, es un juicio basado en décadas de experiencia, no una demostración matemática, así que podría equivocarme. Con todo, me brinda la motivación suficiente para ser optimista

y suponer que el gran desgarro no hará que el resto de los pisos del Empire State Building resulten irrelevantes. Prosigamos, pues, nuestro ascenso por la línea del tiempo.

No tendremos que subir mucho más para encontrarnos con el siguiente evento crucial.

Los precipicios del espacio

Si la intensidad de la fuerza gravitatoria repulsiva no aumenta, sino que se mantiene constante, podemos respirar tranquilos: ya no hay razón para preocuparse de que la expansión del espacio nos haga trizas. Pero como la gravedad repulsiva seguirá empujando a las galaxias lejanas a escapar cada vez más deprisa, todavía tendrá una profunda consecuencia a largo plazo: en un billón de años, la velocidad de recesión de las galaxias lejanas alcanzará la velocidad de la luz, y luego la superará, en aparente violación de la norma más famosa del universo de Einstein. Un escrutinio más meticuloso clarifica que, en realidad, la norma se mantiene inviolada, pues la máxima de Einstein de que nada puede superar la velocidad de la luz se refiere a la velocidad de los objetos que se mueven «por» el espacio. Las galaxias apenas se desplazan por el espacio. No están equipadas con motores de cohete. Del mismo modo que unas motas de pintura blanca adheridas a una pieza de licra se separan cuando estiramos la tela, las galaxias están, por lo general, pegadas al tejido del espacio y si se separan es porque este se expande. Cuanto más alejadas están dos galaxias, mayor es el espacio entre ellas que puede expandirse y, en consecuencia, más deprisa se separan. La ley de Einstein no impone ningún límite a la velocidad de esa recesión.

No obstante, el límite de la velocidad de la luz sigue siendo de enorme importancia. La luz emitida por cada galaxia sí viaja por el espacio. Y del mismo modo que un piragüista no avanza a contracorriente si rema a una velocidad inferior a la del propio río, la luz que emite una galaxia que se aleja a una velocidad superlumínica perderá la batalla en su intento por alcanzarnos. Al cruzar el espacio a la velocidad de la luz, no consigue superar el incremento de la distancia hasta la Tierra, que es superior a esta velocidad. A consecuencia de ello, cuando los futuros astrónomos miren más allá de las estrellas cercanas y enfoquen sus telescopios en las partes más profundas del

firmamento, todo lo que verán será una oscuridad negra como el azabache. Las galaxias más lejanas se habrán ocultado tras los límites de lo que los astrónomos denominan «horizonte cósmico». Será como si las galaxias se hubiesen caído por un precipicio en los confines del espacio.

Me he centrado en las galaxias lejanas porque las que están relativamente cerca, un conjunto de unas treinta conocidas como Grupo Local, seguirán siendo nuestras compañeras cósmicas. De hecho, es probable que para cuando alcancemos el undécimo piso las galaxias del Grupo Local, que está dominado por la Vía Láctea y Andrómeda, se hayan fundido, una futura unión que los astrónomos han bautizado «Lactómeda» (yo me habría decantado por «Androláctea»). Las estrellas de Lactómeda estarán lo bastante cerca como para que sus mutuas atracciones gravitatorias resistan la expansión del espacio y el conjunto estelar se mantenga intacto. Pero la pérdida de contacto con las galaxias más lejanas será una gran pérdida. Fue gracias al estudio minucioso de galaxias lejanas como Edwin Hubble se percató de que el espacio se estaba expandiendo, un descubrimiento confirmado y refinado por un siglo de nuevas observaciones. Sin contacto alguno con las galaxias lejanas, perderemos una herramienta diagnóstica fundamental para seguir la expansión del espacio. Los propios datos que nos guiaron hacia nuestra actual comprensión del Big Bang y la evolución cósmica dejarán de estar a nuestro alcance.

El astrónomo Avi Loeb ha sugerido que las estrellas de alta velocidad que continuamente escapan del conglomerado de Lactómeda y acaban perdiéndose en el espacio profundo podrían ofrecernos un sustituto de las galaxias lejanas, de modo parecido a como tirar palomitas de maíz al agua desde una balsa nos permite conocer las corrientes. Pero el propio Loeb admite que la implacable expansión acelerada tendrá un impacto devastador sobre la capacidad de los futuros astrónomos para hacer mediciones cosmológicas precisas[16]. A modo de ejemplo, llegados al piso 12, un billón de años después del Big Bang, la importantísima radiación de fondo de microondas, que guio nuestras exploraciones cosmológicas en el capítulo 3, estará tan estirada y diluida (en el argot técnico, tan «desplazada al rojo») por la expansión cósmica, que probablemente ya no pueda detectarse.

Da que pensar. Si suponemos que los datos que hemos recogido y que establecen que el universo se está expandiendo lograsen de algún modo preservarse y llegasen a las manos de los astrónomos que haya de aquí a un billón de años, ¿nos creerían? Con la ayuda de sus equipos de última generación, fruto de un billón de años de desarrollo tecnológico, solo verán

un universo que a las distancias más grandes es negro, el negro más eterno e inmutable que pueda concebirse. Cabe imaginar que hicieran caso omiso de unos datos pintorescos que les han llegado de una era antigua y primitiva (la nuestra) y que en su lugar aceptarían la conclusión errónea de que, en su conjunto, el universo es estático.

Pese a vivir en un mundo sujeto al implacable aumento de la entropía, nos hemos acostumbrado a que las mediciones sean cada vez más precisas, que las bases de datos crezcan, que el conocimiento mejore. La expansión acelerada del espacio puede dar al traste con estas expectativas, puede hacer que una información esencial se aleje de nosotros tan deprisa que se torne inaccesible. Hay verdades profundas que para nuestros descendientes serán como la invisible luz de un faro que brilla al otro lado del horizonte.

El crepúsculo de las estrellas

Las primeras estrellas comenzaron a formarse en el octavo piso, unos cien millones de años después del Big Bang, y seguirán haciéndolo mientras quede materia prima para fabricar nuevas estrellas. ¿Cuánto tiempo será eso? Pues bien, la lista de ingredientes es corta: lo único que se necesita es una nube de gas de hidrógeno que sea lo bastante grande. A partir de aquí, como ya sabemos, entra en juego la gravedad, que irá comprimiendo lentamente la nube y calentando su centro hasta prender la fusión nuclear. Si se conoce la cantidad de gas que contiene una galaxia y la velocidad a la cual la formación de estrellas agota esas reservas de gas, se puede estimar durante cuánto tiempo seguirán formándose estrellas. Hay detalles sutiles que hacen que el cálculo sea más complejo (la tasa de formación de estrellas en una galaxias puede cambiar con el tiempo, y a medida que una estrella se consume, devuelve a la galaxia una parte de los gases que la componen, reabasteciendo las reservas), pero con la ayuda de cálculos meticulosos, los investigadores han llegado a la conclusión de que hacia el piso 14, a unos cien billones de años hacia el futuro, la formación de estrellas habrá llegado a su fin en la gran mayoría de las galaxias.

Mientras subimos desde este piso, notaremos algo más: las estrellas comenzarán a apagarse. Cuanto más masiva es una estrella, más se comprime su núcleo bajo su peso y más alta es la temperatura de su centro. La

temperatura más caliente espolea una mayor tasa de fusión nuclear y, por consiguiente, un consumo más rápido de las reservas nucleares de la estrella. Aunque el Sol seguirá brillando con intensidad durante unos diez mil millones de años, las estrellas mucho más pesadas habrán agotado su combustible nuclear mucho antes. En cambio, las estrellas ligeras, hasta más o menos una décima parte de la masa del Sol, se consumen más despacio y viven mucho más tiempo. Los astrónomos usan el término genérico de «enana roja» para referirse a toda una variedad de estrellas de poca masa, y las observaciones apuntan a que constituirían la mayor parte de las que hay en el universo. Sus temperaturas relativamente bajas y su consumo lento y metódico del hidrógeno (las corrientes del interior de una enana roja permiten que casi la totalidad de las reservas de hidrógeno de la estrella acaben quemándose en el núcleo) permitirán que las enanas rojas sigan brillando durante muchos billones de años, miles de veces más de lo que durará el Sol. Pero al llegar al piso 14, hasta las más tardías enanas rojas irán camino de agotar el combustible.

Al ascender desde esta planta, las galaxias se asemejarán a las ciudades quemadas de un futuro distópico. Lo que en otro tiempo fue un firmamento nocturno vivo, lleno de estrellas brillantes, estará poblado ahora por cenizas. No obstante, como el tirón gravitatorio de una estrella solo depende de su masa, y no de si brilla con fuerza o como un apagado rescoldo, la mayoría de las estrellas que alberguen planetas seguirán haciéndolo.

Pero solo durante un piso más.

El crepúsculo del orden astronómico

Si miramos el firmamento nocturno en una noche clara, nos parecerá que la galaxia está densamente poblada de estrellas. No es así. Aunque nos dé la impresión de que las estrellas se apiñan codo con codo en unas esfera que nos envuelve, sus distancias desde la Tierra son muy dispares (una característica que le pasa prácticamente desapercibida a nuestros ojos débiles y poco separados), de modo que las estrellas en realidad se encuentran bastante alejadas unas de otras. Si encogiéramos el Sol hasta el tamaño de un grano de azúcar y lo colocásemos en el Empire State Building, tendríamos que viajar casi hasta Greenwich, en Connecticut (unos cincuenta kilómetros), para llegar

a Próxima Centauri, que es nuestra vecina más cercana. A esta escala, las velocidades típicas de las estrellas se sitúan a menos de un milímetro por hora. Como en un juego de pillapilla entre caracoles muy separados, las colisiones entre estrellas, incluso los amagos de colisión, son muy raros.

Esta conclusión se basa en duraciones que nos resultan familiares (años, siglos, milenios), pero debemos evaluarla a la luz de las escalas de tiempo, mucho más prolongadas, que estamos considerando ahora. Al llegar al piso 15, estamos a mil billones de años de la gran explosión. Y durante un tiempo tan dilatado, la probabilidad de que las estrellas hoy lejanas y lentas se acerquen lo bastante como para colisionar, o casi, no es despreciable. ¿Qué ocurriría si se diera el caso?

Centrémonos en la Tierra e imaginemos que se acerca otra estrella. En función de su masa y trayectoria, su tirón gravitatorio podría perturbar solo muy ligeramente el movimiento de nuestro planeta. Un intruso estelar de peso ligero que se mantenga a buena distancia no causaría ninguna catástrofe. Pero el tirón gravitatorio de una estrella más masiva que pase a menor distancia podría arrancar fácilmente a la Tierra de su órbita y lanzarla más allá del sistema solar, al espacio profundo. Y lo que es cierto para la Tierra, lo es también para la mayoría de los planetas que se encuentran en órbita alrededor de la mayoría de las estrellas de la mayoría de las galaxias. A medida que ascendamos por la línea del tiempo, encontraremos cada vez más planetas lanzados al espacio por la perturbación provocada por la atracción gravitatoria de estrellas caprichosas. De hecho, aunque extremadamente improbable, la Tierra podría sufrir este destino antes de que el Sol se apague.

Si ocurriera eso, a medida que aumentase la distancia entre nuestro planeta y el Sol, la temperatura de la Tierra caería de forma paulatina. Las capas superiores de los océanos se congelarían, como todo en la superficie terrestre. Los gases de la atmósfera, que son sobre todo nitrógeno y oxígeno, se licuarían y lloverían desde el cielo. ¿Podría persistir la vida? Sobre la superficie de la Tierra, sería muy difícil. Pero, como sabemos, la vida florece, e incluso podría haberse originado, en los oscuros humeros hidrotermales que salpican el fondo de los océanos. Ninguna luz puede alcanzar esas profundidades, así que esos lugares apenas se verían afectados por la ausencia del Sol. Buena parte de la energía que alimenta los humeros proviene de reacciones nucleares difusas pero continuas[17]. El interior de la Tierra contiene una reserva de elementos radiactivos (sobre todo torio, uranio y potasio), y, a medida que estos átomos inestables se desintegran, emiten un chorro de partículas energéticas que calientan su entorno. Así, aunque la

Tierra no disfrute del calor que le proporciona la fusión nuclear en el Sol, seguirá gozando del calor generado por la fisión nuclear en su interior. Si nuestro planeta fuese expulsado del sistema solar, es posible que la vida persistiese como si nada en el fondo de los océanos durante miles de millones de años[18].

Los choques estelares no solos perturbarán sistemas solares, también galaxias, aunque en períodos de tiempo aún más dilatados. En amagos de colisión entre estrellas errantes o, más raramente, colisiones frontales, la velocidad de la más pesada tiende a reducirse al tiempo que aumenta la de la más ligera. (Si colocamos una pelota de pimpón sobre otra de baloncesto y dejamos caer el conjunto contra el suelo, veremos que el rebote imparte un impresionante aumento de velocidad a la primera[19]). En cada una de esas colisiones, los intercambios serán modestos, pero con el paso de vastos períodos de tiempo, su efecto acumulado puede producir cambios significativos en las velocidades estelares. El resultado será un inventario cada vez más largo de estrellas que serán lanzadas a tal velocidad que escaparán de su propia galaxia. Cálculos minuciosos revelan que cuando pasemos del piso 19 y nos acerquemos al piso 20, las galaxias típicas irán mermando a causa de este proceso. Sus estrellas, en su mayor parte restos incinerados, serán expulsadas y vagarán sin rumbo por el espacio[20].

El ubicuo orden astronómico que revelan los sistemas solares y las galaxias se habrá disuelto; estas estructuras, hoy tan comunes, se habrán convertido en estructuras retiradas del universo.

Ondas gravitatorias y el último barrido

Si la Tierra tiene la suerte de esquivar el agrandamiento del Sol en el piso 11, y si escapa a la eyección por la turbadora visita de una estrella vecina, su destino final quedará determinado por una característica radicalmente bella de la teoría general de la relatividad: las «ondas gravitatorias».

A la hora de explicar el espacio-tiempo curvo, que es una idea central aunque abstracta de la relatividad general, los físicos suelen recurrir a una metáfora bien conocida: imaginar los planetas en órbita en torno a una estrella cual canicas que ruedan por una lámina de goma tirante deformada por una bola de billar situada en su centro. Pero la metáfora plantea una pregunta:

¿cómo es que los planetas no describen una espiral hacia el Sol y acaban precipitándose hacia este? Al fin y al cabo, ese es el destino que esperaría a las canicas[21]. La respuesta es que las canicas describen una espiral hacia el centro porque van perdiendo energía por fricción. De hecho, no hace falta ningún equipo sofisticado para ver que es así: parte de la energía que pierden llega a nuestros oídos y nos permite oír cómo ruedan las canicas por la lámina de goma. Los planetas en órbita mantienen su movimiento porque en el espacio vacío no hay fricción.

Aunque esta última no intervenga, los planetas pierden una pequeña cantidad de energía en cada órbita. Cuando un cuerpo astronómico se mueve, perturba el tejido del espacio, generando ondas que se propagan hacia fuera de forma parecida a las que se formarían en una lámina de goma si la percutimos repetidamente. Esas ondas en el tejido del espacio son las ondas gravitatorias que Einstein predijo en artículos publicados en 1916 y 1918. En las décadas siguientes, Einstein se mostró inseguro acerca de las ondas gravitatorias, que veía, en el mejor de los casos, como una mera posibilidad teórica que nunca observaríamos y, en el peor de los casos, como una simple interpretación incorrecta de las ecuaciones. Las matemáticas de la relatividad general son tan sutiles que incluso Einstein se sentía a veces perplejo. Hizo falta el trabajo de mucha gente durante muchos años para desarrollar métodos sistemáticos que resolviesen algunas cuestiones espinosas que antes confundían los intentos por relacionar las expresiones matemáticas de la relatividad general con características mensurables del mundo. Hacia la década de 1960, con esos métodos ya firmemente establecidos, los físicos ganaron confianza para afirmar que las ondas gravitatorias eran una consecuencia indiscutible de la teoría. Pero nadie disponía de indicios experimentales u observacionales de que fuesen reales.

Todo eso cambió más o menos una década y media más tarde. En 1974, Russell Hulse y Joe Taylor realizaron el primer descubrimiento de un sistema binario de estrellas de neutrones, es decir, dos estrellas de neutrones unidas en una órbita rápida[22]. Observaciones posteriores establecieron que con el tiempo las estrellas de neutrones describían espirales cada vez más cercanas, lo que indicaba que el sistema binario estaba perdiendo energía. Pero ¿adónde iba esa energía?[23]. Taylor y sus colaboradores Lee Fowler y Peter McCulloch anunciaron que la pérdida de energía orbital que se había medido concordaba notablemente bien con lo que predecía la teoría de la relatividad general sobre la energía que las estrellas de neutrones en órbita deberían trasferir a ondas gravitatorias[24]. Aunque las ondas gravitatorias producidas

eran demasiado débiles para que pudieran detectarse, estas investigaciones establecían, aunque fuese de manera indirecta, que las ondas gravitatorias eran reales.

Tres décadas y mil millones de dólares más tarde, el Observatorio de Ondas Gravitatorias por Interferometría Láser (LIGO, por sus siglas en inglés) dio un paso más cuando logró por fin detectar de manera directa ondas gravitatorias en el tejido del espacio. A primera hora de la mañana del 14 de septiembre de 2015, dos enormes detectores, uno en Luisiana, el otro en el estado de Washington, ambos rigurosamente aislados de cualquier posible perturbación que no fuese una onda gravitatoria, detectaron una señal. Y exactamente de la misma manera. Los investigadores llevaban casi medio siglo preparándose para aquel momento, pero justo entonces, apenas dos días antes, acababan de calibrar los nuevos detectores. Por eso, la llegada casi inmediata de una señal fue tanto una sorpresa como una fuente de preocupación. ¿Era real? ¿Se trataba de un descubrimiento extraordinario o era obra de un bromista, o, peor aún, alguien había pirateado el sistema y había inyectado una señal falsa?

Tras meses de meticulosos análisis, de reiterada comprobación de los detalles de la supuesta perturbación gravitatoria, los investigadores anunciaron por fin que una onda gravitatoria había pasado por la Tierra. Y lo que es más, mediante un análisis preciso de la señal y comparándola con los resultados de simulaciones con supercomputadoras de las ondas gravitatorias que cabía esperar de diversos acontecimientos astronómicos, los científicos consiguieron, mediante una suerte de ingeniería inversa, determinar la procedencia de la señal. Su conclusión fue que hace 1300 millones de años, cuando la vida pluricelular comenzaba a diversificarse en la Tierra, dos lejanos agujeros negros que orbitaban el uno en torno al otro cada vez más cerca y más deprisa, acercándose a la velocidad de la luz, acabaron chocando en un último frenesí orbital. Aquella colisión generó una onda gigantesca en el espacio, un tsunami gravitatorio de tal magnitud que su potencia superó la producida por todas las estrellas de todas las galaxias del universo observable. La onda se expandió a la velocidad de la luz en todas las direcciones, también hacia la Tierra, menguando su potencia a medida que se extendía sobre un espacio cada vez más amplio. Hace cien mil años, cuando los humanos migraban fuera de la sabana africana, la onda atravesó el halo de materia oscura que envuelve la galaxia de la Vía Láctea y siguió su imparable carrera. Hace cien años, pasó por el cúmulo estelar de las Híades y, mientras lo hacía, un miembro de nuestra especie, Albert Einstein, comenzaba a pensar en las

ondas gravitatorias y escribía los primeros artículos sobre esa posibilidad. Hace unos cincuenta años, mientras la onda seguía su carrera, otros investigadores proponían con aplomo que esas ondas podían detectarse y comenzaban a diseñar y planificar un instrumento que pudiera hacerlo. Y cuando la onda se encontraba a tan solo dos días luz de la Tierra, los más avanzados de esos detectores acababan de ser actualizados y quedaban listos para funcionar. Tan solo dos días después, esos dos detectores se agitaron durante doscientos milisegundos, recogiendo datos que permitieron a los científicos reconstruir la historia que acabo de contar. Por este logro, los líderes del equipo, Ray Weiss, Barry Barish y Kip Thorne, fueron galardonados con el premio Nobel en 2017.

Estos descubrimientos, emocionantes por sí mismos, son relevantes para nuestro relato porque es en el piso 23 cuando la Tierra (suponiendo, claro está, que siga en órbita), habiendo perdido energía mediante una versión del mismo proceso (la lenta pero implacable producción de ondas gravitatorias) se precipitará en espiral contra un Sol muerto desde hace tiempo. Para otros planetas, la historia será parecida, aunque a otras escalas de tiempo. Los planetas más pequeños perturban menos el tejido del espacio y, por consiguiente, describen espirales de muerte más largas, al igual que los planetas que describen órbitas más alejadas de su estrella. Si tomamos la Tierra como representativa de los planetas que pueden persistir tenazmente en órbita, llegamos a la conclusión de que hacia el piso 23 esos planetas, resignados a su sino, se precipitarán a una comunión final y violenta con su frío sol.

Durante sus estertores, las galaxias seguirán una secuencia análoga. En el centro de la mayoría de las galaxias hay un enorme agujero negro con una masa millones, incluso miles de millones, mayor que la del Sol. A medida que ascendemos desde el piso 23, las pocas estrellas que queden en las galaxias serán rescoldos consumidos que, tras haber eludido la eyección, se moverán en una lenta órbita alrededor del agujero negro del centro de la galaxia. Y del mismo modo que los planetas describen una espiral lenta hacia el centro mientras entregan su energía orbital a ondas gravitatorias, las estrellas describirán espirales hacia el agujero negro galáctico. Tras estimar la tasa de esa transferencia de energía, los investigadores han llegado a la conclusión de que a la altura del piso 24 se habrán consumido la mayoría de los restos de estrellas, que se habrán precipitado al oscuro abismo central de su galaxia[25]. Si alguna galaxia conserva algún rezagado, estrellas apagadas pequeñas y lejanas, el agujero negro central las ayudará tirando de ellas hacia sí con

tesón, forzándolas a acercarse poco a poco hasta por fin perecer. Si tomamos en cuenta ambas influencias, los agujeros negros barrerán la mayoría de las galaxias, dejándolas limpias de estrellas, hacia el piso 30, unos 10^{30} años después del Big Bang, si no antes.

Para entonces un paseo por el cosmos no será entretenido. Salpicado aquí y allá por planetas fríos, estrellas apagadas y monstruosos agujeros negros, el espacio será negro y desolador.

El destino de la materia compleja

En medio de las extremas transformaciones ambientales que hemos descrito, ¿pueden persistir los seres vivos? Es una pregunta difícil en no poca medida porque, como ya hemos recalcado al principio de este capítulo, no tenemos la menor idea de cómo será la vida en el futuro lejano. Una característica de la que podemos estar bastante seguros es que los seres vivos, del tipo que sean, tendrá que obtener de algún modo energía apropiada para sustentar sus funciones vitales (metabolismo, reproducción y otras). A medida que las estrellas se consuman y apaguen, o sean expulsadas al espacio profundo o caigan en espiral hacia omnívoros agujeros negros, conseguir esa energía será cada vez más difícil. Hay ideas creativas, como aprovechar las partículas de materia oscura que creemos que vagan por el espacio y pueden producir energía cuando colisionan unas con otras transformándose en fotones[26]. La cuestión, sin embargo, es que por mucho que la vida consiga sacar partido de alguna nueva fuente de energía útil, con el tiempo tendrá que vérselas con un nuevo desafío, mucho más importante que cualquier otro.

La propia materia se desintegrará.

En el centro de todos los átomos, y por tanto en todas las moléculas que constituyen todas las estructuras materiales complejas, desde la vida hasta las estrellas, hay protones. Si los protones tuviesen afición a desintegrarse en un rocío de partículas más ligeras (como electrones y fotones), la materia se desmoronaría y el universo cambiaría de manera radical[27]. Nuestra existencia es testimonio de la estabilidad de los protones, al menos a escalas de tiempo congruentes con la duración desde el Big Bang. Pero ¿qué pasará a las escalas de tiempo mucho más prolongadas que consideramos ahora? Durante casi medio siglo, los físicos han encontrado intrigantes pistas

matemáticas de que a lo largo de inmensos períodos de tiempo los protones podrían desintegrarse.

Ya en la década de 1970 los físicos Howard Georgi y Sheldon Glashow desarrollaron la primera «gran teoría unificada», un marco matemático que, sobre el papel, enlaza las tres fuerzas no gravitatorias[28]. Aunque las fuerzas fuerte, débil y electromagnética poseen propiedades enormemente distintas cuando se examinan en experimentos de laboratorio, en el esquema de Georgi y Glashow estas distinciones se diluyen de manera progresiva cuando se examinan a distancias cada vez más pequeñas. La gran unificación propone que estas tres fuerzas no son sino facetas distintas de una única fuerza maestra, aunque esta unidad en el funcionamiento de la naturaleza solo se pone de manifiesto a la escala más minúscula.

Georgi y Glashow se percataron de que junto con los vínculos entre fuerzas que propone la gran unificación se establecen también otros nuevos entre las partículas de la materia. Y esos nexos permiten toda una nueva serie de transmutaciones entre partículas, entre ellas algunas que provocarían la desintegración de los protones. Afortunadamente, es un proceso lento. Sus cálculos muestran que si sostuviésemos un puñado de protones en la palma de la mano y esperásemos a que se desintegrase la mitad de ellos, tendríamos que aguardar alrededor de un billón de trillones de años, lo bastante como para ascender hasta el piso 30 del Empire State Building. Es una predicción curiosa, pero parece que no pueda verificarse. ¿Quién tendría la paciencia para hacerlo?

Pero hay una respuesta simple e ingeniosa. Del mismo modo que la probabilidad de que alguien gane la lotería de esta semana es casi nula si el estado no consigue vender más que un puñado de boletos, pero aumenta en gran manera si se disparan las ventas, la probabilidad de presenciar la desintegración de un protón en una muestra pequeña es casi cero, pero se incrementará enormemente si se agranda la muestra[29]. Por lo tanto, bastará con llenar un depósito gigantesco con millones de litros de agua purificada (cada litro contiene unos 10^{26} protones), rodear la muestra con detectores exquisitamente sensibles y observar con atención, día y noche, en busca de las señales reveladoras de los productos de la desintegración de un protón (que, de acuerdo con la propuesta de Georgi-Glashow, es una partícula conocida como «pion» y un «antielectrón»).

Buscar los detritos particulados de la desintegración de un solo protón nadando en un mar de compañeros tan numerosos que su población supera en mucho la de granos de arena en todas las playas y desiertos del planeta es

como el paroxismo de la legendaria búsqueda de una aguja en un pajar: una misión imposible. Pese a ello, equipos formados por brillantes físicos experimentales han demostrado de manera concluyente que si se desintegrase un solo protón del depósito, sus detectores darían la señal de alarma.

Yo era uno de los estudiantes de Georgi a mediados de la década de 1980, cuando se ponía a prueba su teoría unificada. Todavía no me había graduado y estaba estudiando las materias básicas, así que no comprendía plenamente todo lo que ocurría. Pero podía sentir la expectación. La unidad de la naturaleza, el sueño que con tanta tenacidad había perseguido Einstein, estaba a punto de revelarse. Pero pasó un año entero sin el menor indicio de la desintegración de un protón. Luego otro año. Y otro. La incapacidad de observar la desintegración de un solo protón permitió a los investigadores establecer un límite inferior para la vida media de esta partícula, que actualmente se sitúa en 10^{34} años.

La propuesta de Georgi y Glashow es magnífica. Aunque deja para otro momento el rompecabezas de la gravedad cuántica, su teoría engloba las otras tres fuerzas de la naturaleza y todas las partículas de la materia, y todo ello por medio de una elegante, rigurosa e ingeniosa fusión de matemática y física. Una obra maestra del intelecto. Y, sin embargo, confrontada a la propuesta, la naturaleza simplemente solo se encogió de hombros. Mucho más tarde hablé con Georgi sobre esta experiencia. Me describió los decepcionantes experimentos como «una bofetada de la naturaleza», una experiencia, añadió, que lo volvió en contra de todo el programa de la unificación[30].

Pero el programa de la unificación continuó. Y continúa. Y una característica común de casi todos los enfoques que se han seguido (teorías de Kaluza-Klein, supersimetría, supergravedad, supercuerdas, además de ampliaciones más directas de la propia gran unificación de Glashow, de todo lo cual el lector interesado puede informarse en *El universo elegante*), es que predicen la desintegración de los protones. Las propuestas en las que la tasa de desintegración se acerca a la que estimaron originalmente Georgi y Glashow se descartan de inmediato. Pero muchas de las teorías unificadas que se han planteado predicen tasas más lentas de desintegración de protones que son compatibles con los más refinados límites experimentales. Los números típicos van de 10^{34} años a 10^{37} años, pero algunas predicciones dan vidas medias aún más largas.

El caso es que a medida que hemos ido desarrollando nuestro conocimiento matemático del cosmos, la desintegración de los protones ha escondido la cabeza casi a cada vuelta. No es imposible arreglar las

ecuaciones para evitar la desintegración de los protones, pero conseguirlo suele implicar retorcidas manipulaciones matemáticas que van en contra de las explicaciones teóricas que éxitos anteriores han demostrado ser relevantes para la realidad. A causa de ello, muchos teóricos esperan que los protones realmente lleguen a desintegrarse. Eso podría ser erróneo, y en las notas comento de forma breve la alternativa[31]. Pero aquí adoptaré una propuesta bien definida y supondré que la vida media de los protones es de 10^{38} años.

Lo que esto implica es que pasado el piso 38, todos los átomos que alguna vez se han combinado en cualesquiera de las moléculas que hayan construido absolutamente todas las estructuras que hayan aparecido alguna vez en el cosmos (rocas, agua, conejos, yo, todos nosotros, los planetas, los satélites, las estrellas) se desintegrarán. Todo se desmoronará. En el universo solo quedarán los constituyentes particulados, en su mayor parte electrones, positrones, neutrinos y fotones, que se moverán por un cosmos salpicado aquí y allá por imperturbables y famélicos agujeros negros.

En los pisos inferiores, el principal reto para la vida era conseguir energía apropiada, de alta calidad y baja entropía, para alimentar los procesos que animan la materia. A partir del piso 38, el desafío es más básico. Con la disolución de átomos y moléculas, el propio andamiaje de la vida y la mayor parte de las estructuras del cosmos se habrán desmoronado. Si la vida ha conseguido llegar tan lejos, ¿sucumbirá finalmente ante este último obstáculo? Quizá. Pero tal vez a las escalas de tiempo que estamos considerando (más de mil billones de billones de veces la edad actual del universo) la vida haya evolucionado hacia una forma que mucho tiempo antes se haya deshecho de la necesidad de mantener una arquitectura biológica como la que hoy requiere. Quizá las propias categorías de vida y mente resulten ya burdas y torpes ante futuras encarnaciones que nos obliguen a definir nuevas categorías.

Bajo toda esta especulación yace el supuesto de que vida y mente no dependan de ningún sustrato físico particular, ni células, ni cuerpos ni cerebros, sino que sean colecciones de procesos integrados. Hasta el momento, la biología ha monopolizado las actividades de los seres vivos, pero quizá eso solo refleje los caprichos de la evolución por medio de la selección natural en el planeta Tierra. Si alguna otra manera de ensamblar partículas básicas pudiera ejecutar fielmente los procesos de la vida y la mente, ese sistema viviría, pensaría.

En nuestro relato adoptaremos la perspectiva más amplia y consideraremos la posibilidad de que incluso en ausencia de átomos y

moléculas complejas pueda existir todavía algún tipo de mente pensante. Y nos preguntamos: dada la restricción única pero absolutamente inflexible de que el pensamiento obedezca plenamente las leyes de la física, ¿puede este persistir de manera indefinida?

El futuro del pensamiento

Evaluar el futuro del pensamiento puede parecer un clásico acto de soberbia. Cada uno de nosotros sabemos, por experiencia personal, lo que es pensar, pero tal como manifestamos en el capítulo 5, la ciencia rigurosa de la mente todavía está en pañales. En la ciencia del movimiento, pasamos de las leyes de Newton a las radicalmente distintas de Schrödinger en menos de tres siglos. ¿Cómo podemos decir nada relevante sobre el futuro del pensamiento a una escala de tiempo en la que mil millones de siglos apenas se notan?

La pregunta evoca uno de nuestros temas centrales. El universo puede y debe entenderse desde un amplio abanico de perspectivas distintas. Las explicaciones resultantes, cada una de ellas relevante para distintos tipos de preguntas, deben condensarse eventualmente en una narración coherente, pero podemos ir avanzando en algunos de los relatos, incluso con un conocimiento limitado de otros. Newton no tenía la menor intuición de la física cuántica, pero logró arrojar luz sobre el tipo de movimiento que experimentamos en nuestra vida cotidiana. Con la llegada de la física cuántica, el edificio de Newton no se desmanteló, sino que se renovó. La mecánica cuántica sentó unos nuevos cimientos que permitieron ampliar el alcance de la ciencia y dieron una nueva interpretación a la estructura newtoniana.

Es posible que las actuales cavilaciones matemáticas sobre el futuro de la mente resulten ser irrelevantes. Después de todo, salvo que uno esté especialmente bien versado en la historia de la física y la filosofía, probablemente no haya oído hablar nunca de la descripción aristotélica del movimiento como entelequia o de la teoría de Empédocles de la visión por medio del fuego del ojo. Cuando exploramos, los humanos nos equivocamos en algunas cosas (bueno, en muchas). Pero como en el caso de la física newtoniana, existe la posibilidad de que algún día esas cavilaciones se consideren parte de una narración más completa. Es con este sentido

optimista, racional y moderado, como tomamos ahora en consideración el pensamiento en un futuro muy lejano.

En 1979, Freeman Dyson escribió un artículo visionario sobre el futuro lejano de la vida y la mente[32]. Seguiremos de cerca la senda que abrió, actualizada con avances teóricos y observaciones astronómicas más recientes. El enfoque de Dyson, como el nuestro a lo largo de estas páginas, adopta una visión fisicalista de la mente, puesto que considera que el acto de pensar es un proceso físico y, por tanto, sometido por completo a la ley física. Y como somos capaces de hacernos una idea bastante buena de cómo evolucionarán las características generales del universo en el futuro lejano, nos preguntamos si todavía existirán ambientes que puedan acoger el pensamiento.

Para comenzar, pensemos sobre nuestro cerebro. Aparte de sus otras cualidades, el cerebro está caliente. Continuamente consume energía (que le suministramos gracias a que comemos, bebemos y respiramos), realiza un gran número de procesos que modifican su configuración detallada (reacciones químicas, reordenaciones de las moléculas, movimientos de partículas, y otras), y expulsa calor residual a su entorno. Así pues, cuando nuestro cerebro piensa (y hace todo lo demás que hacen los cerebros), recapitula una secuencia que comenzamos a examinar en el capítulo 2, refiriéndonos entonces a las máquinas de vapor. Como en aquel ejemplo, el calor que nuestro cerebro expulsa al entorno se lleva consigo entropía que absorbe o que genera mediante su propio funcionamiento interno.

Si, por la razón que sea, una máquina de vapor no logra eliminar la entropía que acumula, tarde o temprano se colapsa y estropea. Parecido destino le aguarda a un cerebro que, por la razón que sea, no pueda deshacerse de los desechos entrópicos que su funcionamiento produce de manera constante. Y un cerebro que se estropea es un cerebro que ya no piensa. Ese es el potencial desafío a la durabilidad del pensamiento con base en un cerebro. A medida que el universo avanza hacia el futuro, ¿podrán mantener los cerebros la capacidad de eliminar el calor residual que produzcan?

Nadie espera que el cerebro humano sea una presencia continua a medida que ascendemos desde el presente hacia pisos más altos. Y es obvio que cuando hayamos ascendido tanto que los átomos comiencen a desintegrarse en partículas más básicas, los agregados moleculares complejos de cualquier tipo serán cada vez más raros. Pero el diagnóstico basado en el requisito de expeler el calor residual es tan fundamental que se aplica a cualquier configuración, del tipo que sea, que piense. Así que la cuestión esencial es si

esa entidad (la que sea; llamémosla «Pensadora»), puede, con independencia de cómo esté diseñada o construida, expeler el calor que su pensamiento necesariamente genera. Si la Pensadora no puede hacerlo, se sobrecalentará y se quemará en su propio residuo entrópico. Y si las restricciones que impone la ley física en un universo en expansión dictasen que tarde o temprano toda Pensadora está destinada a fracasar en esta tarea indispensable de expulsión de la entropía, el futuro del propio pensamiento quedaría sellado.

Por consiguiente, antes de evaluar qué sucederá con el pensamiento tenemos que entender la física del mismo. ¿Cuánto energía requiere el pensamiento de la Pensadora y cuánta entropía adicional genera? ¿A qué velocidad necesita expeler el calor residual y a qué ritmo puede absorberla el universo?

Pensamiento lento

Anteriormente, en el capítulo 2, remarqué que la entropía cuenta el número de reordenaciones de los constituyentes microscópicos de un sistema físico (sus partículas) que «tengan un aspecto parecido». Al analizar la Pensadora, hay una manera bastante útil de enunciar lo mismo. Si un sistema tiene poca entropía, entonces la configuración de sus partículas es una entre un número relativamente bajo de configuraciones que producen un aspecto parecido, una entre relativamente pocas réplicas. En consecuencia, si digo en cuál de esas configuraciones posibles se encuentra en realidad el sistema, habré aportado solo una pequeña cantidad de información. Como especificar una lata concreta de sopa de tomate Campbell en la balda pobremente abastecida de una tienda, solo habré distinguido esta particular configuración de partículas de entre un pequeño número de posibilidades. Si un sistema tiene alta entropía, la configuración de sus partículas es una de entre muchísimas posibilidades de idéntico aspecto, una entre muchísimas réplicas. En consecuencia, si digo en cuál de esas configuraciones se encuentra en realidad el sistema, habré aportado una gran cantidad de información. Como cuando distingo una lata concreta de sopa de tomate de una balda excesivamente abastecida de un supermercado, habré distinguido esta configuración concreta de partículas de entre un ingente número de posibilidades. Así pues, en un sistema de baja entropía, la configuración de las partículas tiene un bajo

contenido de información, mientras que en un sistema de alta entropía, este resulta muy elevado.

El vínculo entre entropía e información es importante porque con independencia de dónde tenga lugar el pensamiento (dentro de un cerebro humano o dentro de la Pensadora abstracta), pensar es procesar información. La conexión entre información y entropía nos dice que el procesamiento de los datos, el acto de pensar, puede describirse también como procesamiento de entropía. Y puesto que, como se recordará del capítulo 2, el procesamiento de entropía (mover entropía de un lado a otro) requiere una transferencia de calor, lo que tenemos es una combinación de tres conceptos: pensamiento, entropía y calor. Dyson aprovechó la versión matemática de los enlaces entre estos tres conceptos para cuantificar el calor que la Pensadora tiene que expulsar en función del número de pensamientos que procese. (Para los interesados en las matemáticas, la fórmula está en las notas)[33]. Un gran número de pensamientos implica una gran cantidad de calor que hay que expulsar. Menos pensamientos, menos calor.

Ahora bien, para alimentar su pensamiento, la Pensadora tiene que extraer energía de su entorno. Y como el calor también es una forma de energía, la cantidad de esta que absorbe la Pensadora debe ser al menos tan grande como la cantidad de calor que tiene que expulsar. La energía entrante es de mayor calidad (para que pueda ser aprovechada fácilmente por la Pensadora) que la energía saliente (que es un desecho y estará dispersa), pero sea como sea, la Pensadora no puede expulsar más de lo que absorbe. Así pues, los cálculos de Dyson especifican la mínima energía de alta calidad que la Pensadora tiene que absorber del entorno, y con ello cuantifica el desafío: a medida que las estrellas se apaguen, los sistemas solares se desmoronen, las galaxias se dispersen, la materia se desintegre y el universo se expanda y enfríe, la Pensadora se enfrentará a la tarea, cada vez más difícil, de hacerse con la energía concentrada, de alta calidad y baja entropía, que necesita para seguir cavilando. Cuando el suministro sea escaso, la Pensadora necesitará un estrategia eficaz para la gestión de los recursos y la eliminación de los residuos; dicho de otro modo, necesitará un plan detallado para absorber energía de baja entropía y deshacerse del calor de alta entropía. Siguiendo a Dyson, veamos cuál podría ser.

Empecemos por hacer la suposición razonable de que la velocidad de los procesos internos de la Pensadora, sean los que sean, son proporcionales a su temperatura[34]. Cuando esta es más alta, las partículas se mueven más rápido, consumen energía más deprisa y acumulan desechos con mayor velocidad. A

menor temperatura, todo eso se hace más lentamente. Enfrentada a un universo que se expande, se enfría y decae, la Pensadora, que aspira a seguir pensando tanto tiempo como pueda, necesita dar prioridad a la conservación, es decir, necesita realizar una combustión lenta y larga en lugar de destellos rápidos e intensos. Así pues, aconsejamos a la Pensadora que siga el ejemplo del universo: con el tiempo, debería reducir su temperatura, hacer más lento el pensamiento y aminorar su tasa de consumo del suministro cada vez más escaso de energía de calidad del universo.

Como pensar es lo único que hace la Pensadora, la perspectiva de hacerlo más despacio no resulta particularmente atractiva. Consolémosla. «Míralo de este modo —le decimos—. Como «todos» tus procesos internos se harán más lentos al mismo tiempo, tu experiencia subjetiva no cambiará para nada. No notarás ninguna alteración en tu pensamiento. Quizá veas que algunos procesos de tu entorno parecen producirse más deprisa, pero te va a parecer que tus pensamientos se producen con la misma celeridad». Aliviada, la Pensadora conviene en seguir la estrategia, pero nos hace saber una última preocupación: «Si lo hago así, ¿podré continuar teniendo pensamientos nuevos para siempre?».

Esta es la pregunta esencial, y esperábamos que la Pensadora la formulase, así que estamos preparados para responderla. La matemática revela que de modo parecido a como el kilometraje de un coche mejora cuanto más despacio se conduce, el consumo de la Pensadora, expresado como pensamientos por unidad de energía, aumenta también cuanto más despacio piensa. Es decir, el pensar de la Pensadora se hace cada vez más eficiente a medida que desciende la temperatura. Por esta razón, la Pensadora puede pensar un número «infinito» de pensamientos con un suministro «finito» de energía (del mismo modo que una serie infinita como $1 + 1/2 + 1/4 + \dots$ puede sumar un número finito, en este caso 2). Excitados, comunicamos el resultado a la Pensadora: «Si sigues el plan, no solo podrás seguir pensando para siempre, ¡podrás hacerlo con un suministro finito de energía!»[35].

Exultante, la Pensadora está a punto de poner en práctica el plan. Pero entonces nos encontramos con un problema inesperado. Hay una incordiante implicación de la matemática que hasta ahora hemos pasado por alto: de modo parecido a como una taza de café templado expulsa menos calor a su entorno que una de café caliente, cuanto más fría sea la Pensadora, menor capacidad tendrá de expulsar el calor residual generado por su pensamiento. «No me conoces mucho —nos recuerda la Pensadora—, así que mejor ser

discretos antes de esparcir el rumor de que tengo problemas para expulsar desechos». Tomo nota. Aunque la verdad es que eso es lo más hermoso del cálculo. El razonamiento solamente supone que la Pensadora se encuentra sujeta a las leyes conocidas de la física y está compuesta por partículas elementales, por ejemplo electrones. Por lo tanto, el análisis es completamente general. No necesitamos conocer los detalles de la fisiología o la construcción de la Pensadora para concluir que a medida que su temperatura descienda, la tasa de expulsión de entropía caerá por debajo de la de producción. Ante la evidencia, no tenemos más remedio que comunicar la mala noticia. «Aunque el pensar a temperaturas cada vez más bajas es esencial para prolongar el pensamiento con un suministro finito de energía, llegará un momento en que tu entropía se acumulará más deprisa de lo que podrás expulsarla. A partir de ese momento, si intentas pensar más te quemarás en tus propios pensamientos»[36].

Antes de que la desalentada Pensadora pueda asimilar la noticia, un miembro de nuestro brillante equipo propone una solución: la hibernación. La Pensadora necesita descansar periódicamente, apagar la mente y dormir, poniendo así en pausa la producción de entropía mientras sigue expulsando su calor residual. Si el descanso es lo bastante prolongado, cuando despierte habrá expulsado todo el desecho y no correrá el peligro de quemarse. Y como la Pensadora no pensará durante la pausa, cuando despierte ni siquiera se dará cuenta de la interrupción. Animada por la solución, que propuso Dyson en su artículo pionero, aseguramos a la Pensadora que, si sigue esta pausa, el pensamiento puede prolongarse indefinidamente.

¿O no?

Un último pensamiento sobre el pensamiento

Dos cosas hemos aprendido durante las décadas que han transcurrido desde el artículo de Dyson que son especialmente relevantes para esta estrategia. Una de ellas clarifica el vínculo entre el acto de pensar y la producción de entropía y nos lleva a reinterpretar en cierta medida el resultado. La otra trae a colación la expansión acelerada del espacio, que podría socavar profundamente nuestra conclusión y situar el pensamiento en el punto de mira de la entropía.

Primero, la reinterpretación. El núcleo del razonamiento de Dyson es que el acto de pensar produce, por necesidad, calor. Hice notar lo plausible de esta interpretación recordando que el pensamiento está vinculado a la información; la información, a la entropía, y la entropía, al calor. Pero los vínculos son sutiles, y algunas ideas recientes, derivadas sobre todo de la ciencia de la computación, muestran que hay maneras más ingeniosas de procesar información elemental (como sumar uno y uno para obtener dos) sin degradar energía[37]. Bajo la suposición de que pensamiento y computación son una y la misma cosa, la Pensadora podría decidirse por esta estrategia y no generar ningún residuo.

No obstante, otras consideraciones de la ciencia de la computación indican que la conexión pensamiento-entropía-calor que alentó nuestros primeros análisis sigue intacta, solo que en una versión un tanto distinta. Los resultados muestran que si una computadora «borra» alguno de sus bancos de memoria, necesariamente se produce calor residual. (Recordemos que este último suelen generarlo los procesos difíciles de revertir, como hacer añicos una copa; borrar datos hace que sea más difícil invertir una computación, así que no resulta sorprendente que borrar produzca calor.)[38] Si tomamos esto en cuenta, nuestro consejo para la Pensadora solo necesita una leve modificación. La Pensadora «puede» pensar sin necesidad de purgar calor siempre y cuando nunca borre un recuerdo. Pero si suponemos que la Pensadora tiene una extensión finita, también tendrá una memoria finita que tarde o temprano acabará llenándose. Llegado ese momento, la Pensadora solo podrá reordenar internamente la información que tenga fijada en la memoria cavilando una y otra vez sobre viejos pensamientos, lo cual no es una forma de inmortalidad que muchos escogerían. Si la Pensadora desea conservar la capacidad creativa para pensar pensamientos nuevos, para generar nuevos recuerdos y explorar nuevos paisajes intelectuales, no tendrá más remedio que borrar algo y, al hacerlo, producirá calor, lo cual nos lleva de vuelta a la situación que comentamos en la sección anterior, y cabe recomendar una vez más la estrategia de la hibernación.

La segunda cuestión es más apremiante. El descubrimiento de que la expansión del espacio se está acelerando plantea un obstáculo nuevo y puede que insuperable para el pensamiento sin fin[39]. Si, tal como los datos actualmente sugieren, la expansión acelerada no cesa, entonces, tal como descubrimos en el piso 12, las galaxias lejanas desaparecerán como si hubiesen caído por un precipicio en los confines del espacio. Dicho de otro modo, estamos rodeados de un lejano horizonte esférico que delimita la

frontera de lo que, incluso en principio, podemos ver. Todo lo que está a más distancia de ese límite se aleja de nosotros a una velocidad superior a la de la luz, de modo que la luz emitida desde esas distancias no nos alcanzará nunca. Es la lejana frontera que los físicos conocen como «horizonte cosmológico».

Podemos imaginar el lejano horizonte del cosmos como una enorme bola resplandeciente, un poco como una retícula esférica de lejanas lámparas que generan una temperatura de fondo en el espacio. Explicaré la razón de que sea así en el próximo capítulo (está muy relacionada con la física de los agujeros negros, que también tienen horizontes resplandecientes, como descubrió Stephen Hawking); ahora me interesa recalcar que la temperatura del horizonte cosmológico resplandeciente es completamente distinta de la temperatura del fondo de microondas de 2,7 kelvin que nos ha dejado el Big Bang. Con el tiempo, la temperatura de fondo de microondas seguirá enfriándose, acercándose al cero absoluto a medida que el espacio se expanda y la radiación de microondas se diluya en intensidad. La temperatura generada por el horizonte cosmológico se comporta de otro modo. Es constante. Aunque es minúscula (a partir de las medidas de la tasa de expansión acelerada se estima en unos 10^{-30} kelvin), es persistente. Y a muy largo plazo lo que importa es la persistencia.

El calor solo fluye espontáneamente de las cosas que están más calientes a las que están más frías. Mientras la temperatura de la Pensadora sea superior a la del universo, podrá irradiar su calor residual hacia el espacio. Pero cuando su temperatura se reduzca por debajo de la del espacio, el calor fluirá en la otra dirección, del espacio a la Pensadora, impidiendo que esta pueda deshacerse del calor residual. Esto implica que la estrategia de la hibernación está destinada a fracasar. A medida que la Pensadora reduzca su temperatura (que, recordemos, es lo que le permite seguir pensando de manera indefinida con un suministro finito de energía), acabará alcanzando aquellos minúsculos 10^{-30} kelvin, y entonces se habrá acabado el juego. El universo no aceptará su residuo. Un solo pensamiento más (o, para ser más precisos, un solo borrado más), y la Pensadora quedará frita.

Esta conclusión se apoya en que la expansión acelerada del espacio persiste sin cambios, lo cual es una suposición. Nadie sabe si será así. La aceleración podría aumentar, empujándonos entonces hacia el gran desgarro y reduciendo aún más las perspectivas de la vida y el pensamiento. O podría disminuir. Eso obviaría el horizonte cosmológico, apagaría las lejanas lámparas de calor y permitiría que la temperatura del universo se redujese indefinidamente. Tal como mostraron los físicos Will Kinney y Katie Freese,

esta posibilidad cosmológica restablecería el optimismo inicial de Dyson, pues permitiría que la Pensadora siguiese pensando de forma indefinida en el futuro, siempre y cuando obedeciese con diligencia el calendario de hibernación[40].

Lejos de mí la intención de apagar todo rayo de esperanza sobre el futuro del pensamiento, pero conviene que repasemos el estado de la cuestión. Toda nuestra cadena de razonamiento está forjada con optimismo. En un universo que podría estar desprovisto de todo, desde las estrellas y planetas hasta las moléculas y los átomos, hemos supuesto que puede existir una entidad pensadora. Aunque habrá partículas elementales (como los electrones, los neutrinos y los fotones) dando vueltas de un lado para otro, hace falta una imaginación muy fértil para que el ojo de la mente las vea organizadas en forma de una estructura pensante. No obstante, para ser tan abiertos de miras como sea posible, hemos supuesto que esa entidad puede formarse. Y sin duda es gratificante descubrir que si el universo se expande en la dirección adecuada, hay al menos una posibilidad de que las Pensadoras puedan pensar indefinidamente. Aun así, es difícil eludir la conclusión de que el futuro lejano del pensamiento es precario.

En efecto, si la expansión acelerada no se frena, llegará un día en que el pensamiento haga su última reverencia. Nuestro conocimiento es todavía demasiado burdo como para hacer una predicción precisa, pero si insertamos valores razonables en las ecuaciones, los resultados indican que eso podría ocurrir durante los próximos 10^{50} años. Una gran incógnita, como dejamos claro desde el principio, es si la vida inteligente podrá interceder en el despliegue del cosmos, afectando, por ejemplo, la evolución de estrellas y galaxias, aprovechando fuentes inimaginables de energía de alta calidad, incluso controlando la tasa de expansión del espacio. Dada la complejidad de la inteligencia, es imposible ponderar este extremo con nada que no sea una especulación desmedida, y por eso he preferido ignorar esas influencias. Así pues, si dejamos de lado la intervención inteligente y nos ceñimos a los dictados de la segunda ley de la termodinámica, debemos concluir que cuando alcancemos el piso 50, el universo podría haber realizado su último pensamiento.

En comparación con todas las escalas que contemplamos los humanos, 10^{50} años es una duración extraordinaria. Podemos meter en ella todo el tiempo que va del Big Bang al momento presente más de un trillón de trillones de veces. Pero visto desde la altura del piso 75, por ejemplo, 10^{50} años no es nada: es mucho menos, ridículamente menos, que nuestra

experiencia del tiempo que transcurre desde el momento en que encendemos una lámpara de mesa y el momento en que percibimos que la luz alcanza nuestros ojos. Y, por supuesto, si el universo es eterno, cualquier duración, por larga que sea, se queda en un infinitesimal. Narrada desde la perspectiva de esas escalas mucho más largas, el relato cosmológico sería algo así: un momento después del Big Bang surgió la vida, brevemente contempló su existencia dentro de un cosmos indiferente, y se desvaneció. Es una recapitulación cósmica del lamento de Pozzo cuando clama contra quienes esperan a Godot: «Dan a luz a horcajadas sobre una tumba, la luz brilla apenas un instante, y otra vez llega la noche».

A algunos este futuro les parecerá desolador. Aun con su más rudimentario conocimiento de mediados del siglo XX, se lo pareció a Bertrand Russell, cuya evaluación de esta cuestión conocimos en el capítulo 2. Yo lo veo de otro modo. Para mí, el futuro que la ciencia nos deja entrever subraya lo insólito, asombroso y valioso que es a la vez nuestro momento de pensamiento, nuestro instante de luz.

10

EL OCASO DEL TIEMPO

Cuantos, probabilidad y eternidad

Mucho después de que concluya el pensamiento, cuando ya no quede entidad alguna que cavile, las leyes de la física seguirán haciendo lo que siempre han hecho: dictar el despliegue de la realidad. Al hacerlo, las leyes pondrán de manifiesto algo esencial: la mecánica cuántica y la eternidad conforman una poderosa unión. La mecánica cuántica es un tipo especial de soñador romántico que permite un amplísimo abanico de futuros posibles al mismo tiempo que atempera sus visiones más descabelladas especificando la probabilidad de cada posibilidad. Más allá de las escalas de tiempo que nos son familiares, podemos ignorar sin perjuicio aquellas posibilidades cuyas probabilidades cuánticas son tan espectacularmente bajas que tendríamos que esperar mucho más que la edad del actual universo para tener una probabilidad razonable de presenciarlas. Pero a unas escalas de tiempo tan extraordinariamente dilatadas que, en comparación, la edad actual del universo es un instante fugaz, muchas posibilidades que antes podíamos barrer a un lado ahora reclaman nuestra atención. Y si de verdad no hay final para el tiempo, todas las posibilidades que no estén prohibidas de manera específica por las leyes cuánticas (familiares o extrañas, probables o improbables), tarde o temprano tendrán su momento de gloria[1].

En este capítulo examinaremos unos cuantos de esos raros procesos cosmológicos que aguardan su momento, que esperan a ser llamados para entrar en el escenario de la realidad.

La desintegración de los agujeros negros

A mediados del siglo XX, tras el papel decisivo que desempeñaron en los episodios finales de la segunda guerra mundial, los físicos gozaron de gran prestigio. Las áreas de investigación predominantes eran la física nuclear y de partículas, unas investigaciones que, en palabras de Freeman Dyson, habían dotado a los físicos de unos poderes que parecían propios de los dioses para «liberar la energía que alimenta las estrellas […] para lanzar al cielo un millón de toneladas de roca»[2]. La relatividad general, en cambio, se veía más bien como una disciplina especializada que ya había vivido sus días de gloria. Pero el físico John Wheeler cambiaría todo eso. Las aportaciones de Wheeler a las físicas nuclear y cuántica fueron numerosas e influyentes, pero sentía un perdurable afecto por la teoría de la relatividad general. También gozaba de un extraño don para contagiar su entusiasmo a otros. Durante las décadas siguientes, Wheeler formó a algunos físicos magistrales que colaboraron con él para restablecer la relatividad general como un estimulante campo de la investigación científica.

Wheeler sentía una especial fascinación por los agujeros negros. De acuerdo con la relatividad general, lo que cae dentro de uno de estos no puede escapar. Desparece, y para siempre. Mientras reflexionaba sobre esta cuestión a principios de la década de 1970, Wheeler fue a dar con un enigma que mencionó a su alumno de doctorado Jacob Bekenstein. Los agujeros negros parecían ofrecer una estrategia ideal para violar la segunda ley de la termodinámica. Si cogemos una taza de té caliente, cavilaba Wheeler, y tiramos el té al agujero negro más cercano, ¿adónde va a parar la entropía del té? Dado que el interior de un agujero negro es permanentemente inaccesible desde el exterior, el té caliente, junto con su entropía, en apariencia habrán desaparecido. A Wheeler le preocupaba que la eliminación de entropía en un agujero negro resultase ser un medio fiable para violar a voluntad la segunda ley.

Al cabo de unos meses, Bekenstein le comunicó a Wheeler una solución. La entropía del té no desaparece, le explicó, sino que simplemente se transfiere al agujero negro. Del mismo modo que al coger una sartén caliente, una parte de su entropía se transfiere a la mano, Bekenstein sugería que todo lo que cae en un agujero negro transfiere su entropía al propio agujero negro.

Es una respuesta natural, y ya se le había ocurrido a Wheeler[3]. Sin embargo, enseguida topa con un problema. La entropía, como hemos visto, cuenta el número de reordenaciones de los constituyentes de un sistema que lo dejan «con aspecto prácticamente idéntico». O, para ser más precisos, la entropía cuenta las distintas configuraciones de los constituyentes microscópicos de un sistema que son compatibles con su estado macroscópico. Si el té transfiere su entropía al agujero negro, esta debería manifestarse como un aumento del número de reordenaciones internas del agujero negro que mantienen sus características macroscópicas.

He aquí el problema. A finales de la década de 1960 y principios de la de 1970, los físicos Werner Israel y Brandon Carter utilizaron las ecuaciones de la relatividad general para demostrar que un agujero negro está plenamente determinado por tan solo tres números: masa, momento angular (la velocidad a la que gira) y carga eléctrica[4]. Una vez medidas estas tres características macroscópicas, se dispone de toda la información necesaria para describir por completo el agujero negro. Eso implica que dos agujeros negros cualesquiera con las mismas características macroscópicas (la misma masa, el mismo momento angular y la misma carga eléctrica) son idénticos hasta el último detalle. Así pues, a diferencia de una colección de monedas para la que una vez especificado un estado, por ejemplo 38 caras y 72 cruces, permite trillones de configuraciones distintas de las monedas, y a diferencia de un depósito de vapor en el que si especificamos el volumen, la temperatura y la presión, permite un número ingente de configuraciones distintas de las moléculas, en el caso de los agujeros negros, especificar una masa, un momento angular y una carga eléctrica apunta rígidamente a una, y solo una, configuración. Sin más configuraciones en la lista, sin más réplicas que enumerar, da la impresión de que un agujero negro carezca de entropía. Si tiramos en él una taza de té, tenderemos a pensar que su entropía se desvanece. Frente a un agujero negro, parece que la segunda ley de la termodinámica se deje vencer.

Bekenstein no estaba dispuesto a que fuese así. Los agujeros negros, proclamó, «tienen» entropía. Más aún, cuando algo cae en su interior, la entropía del agujero negro aumenta de la forma precisa para que el mundo siga obedeciendo la segunda ley. Para hacerse una idea del razonamiento de Bekenstein, observemos primero que cuando algo cae en un agujero negro, su masa no se pierde. Cualquiera que hubiera estudiado y entendido la relatividad general estaría de acuerdo en que cualquier cosa que cayera en uno de estos lugares se manifestaría como un aumento de la masa del propio

agujero negro. Para visualizar este proceso, pensemos en el «horizonte de sucesos» del agujero negro, la superficie esférica que define sus límites señalando los lugares más allá de los cuales no hay retorno posible. La matemática nos dice que el radio del horizonte de sucesos es proporcional a la masa del agujero negro: menos masa implica un horizonte un poco más pequeño; más masa, un horizonte mayor. Cuando tiramos algo a un agujero negro, su masa aumenta, y podemos imaginar que su horizonte se hincha en respuesta a ello. Cuando el agujero negro come, su cintura esférica se ensancha.

En el espíritu del enfoque de Bekenstein[5], imaginemos ahora que tiramos una sonda muy especial, cuidadosamente diseñada para examinar cómo responde un agujero negro a la entropía. Con este propósito, preparamos un único fotón de una longitud de onda tan larga (cuyas posibles ubicaciones están tan dispersas) que cuando se encuentra con el agujero negro, la descripción más precisa que podemos dar del resultado es expresada por una sola unidad de información: el fotón cayó en el agujero negro, o no cayó. Por diseño, la posición del fotón es tan nebulosa que si es capturado por el agujero negro no podemos proporcionar una descripción más detallada, como por ejemplo que el fotón entró en el agujero negro por tal o cual lugar del horizonte. Ese fotón es portador de una sola unidad de entropía, de manera que nos permite examinar matemáticamente cómo responde el agujero negro cuando engulle una sola ración de entropía.

Como el fotón posee energía, y como energía y masa son dos caras de la misma moneda einsteiniana (por $E = mc^2$), si el agujero negro consume el fotón, su masa aumentará ligeramente y su horizonte de sucesos se expandirá de forma muy leve. Pero el beneficio está en los detalles. Bekenstein se dio cuenta de una pauta crucial: al tirar una unidad de entropía, el horizonte de sucesos del agujero negro se expandirá en una unidad de área (la llamada «unidad cuántica de área» o «área de Planck», que es de unos 10^{-70} metros[6]). Si tiramos dos unidades de entropía, la superficie aumentará en dos unidades de área. Y así sucesivamente. Por tanto, el área del horizonte de sucesos de un agujero negro parece llevar la cuenta de la entropía que este ha ingerido. Bekenstein elevó esta pauta al rango de proposición: «La entropía total de un agujero negro viene dada por el área total de su horizonte de sucesos» (medida en unidades de Planck). Esta fue la nueva idea que Bekenstein comunicó a Wheeler.

Bekenstein no podía explicar el sorprendente vínculo entre la entropía de un agujero negro y su superficie externa, su horizonte de sucesos; el vínculo

es inesperado porque la entropía de un objeto corriente, como cierta cantidad de té, está contenida en su interior, en su volumen. Tampoco conseguía explicar cómo se relacionaba su proposición con el marco convencional en el que la entropía debería enumerar las reordenaciones posibles de los ingredientes microscópicos del agujero negro (una cuestión que quedaría pendiente hasta mediados de la década de 1990, cuando la teoría de cuerdas arrojaría algo de luz). Pero su propuesta ofrecía, por lo menos, una forma cuantitativa de rescatar la segunda ley de la termodinámica. El arreglo es inmediato: al calcular la entropía total, no basta con contar las contribuciones de materia y radiación, sino también las de los agujeros negros. Tirar el té en uno de estos lugares reduce la entropía en la mesa del desayuno, pero si calculamos el aumento del área del horizonte de sucesos del agujero negro, nos damos cuenta de que la reducción entrópica que experimentamos en casa queda compensada por un aumento entrópico en él. Al proveer un algoritmo para incluir los agujeros negros en los balances de entropía, Bekenstein revitalizó la segunda ley, que ya podía caminar otra vez con la cabeza bien alta.

Cuando Stephen Hawking conoció la propuesta de Bekenstein, le pareció absurda. Lo mismo pensaron muchos otros físicos. Determinados por completo por tan solo tres números y formados básicamente por espacio vacío (todo lo que cae en ellos resulta atraído de forma implacable hacia su singularidad central), los agujeros negros habían adquirido un halo de absoluta simplicidad. Dicho rápido y mal, se creía que estos lugares no podían tener desorden porque no había nada en su interior que pudiera desordenarse. Tras dirigir la carga contra la propuesta de Bekenstein, Hawking se aprestó a hacer sus propios cálculos usando una delicada combinación de relatividad general y mecánica cuántica que esperaba que revelase enseguida una falacia en su razonamiento. No fue así, sino que los cálculos lo llevaron a una conclusión tan sorprendente que tardó tiempo en creérsela. El análisis de Hawking no solo confirmaba el de Bekenstein, sino que ponía de manifiesto algunas sorpresas más: los agujeros negros tienen «temperatura» y «resplandecen». Emiten radiación. Los agujeros negros solo son negros en el nombre. O, para decirlo de manera más precisa, solo son negros si se ignora la física cuántica.

Veamos muy brevemente la esencia del razonamiento de Hawking.

De acuerdo con la mecánica cuántica, toda región minúscula del espacio albergará siempre alguna actividad cuántica. Aunque parezca estar vacía y no contener energía alguna, la teoría cuántica nos dice que en realidad su

contenido de energía fluctúa rápidamente arriba y abajo, dando como resultado una energía cero solo «en promedio». Se trata de fluctuaciones cuánticas del mismo tipo que las que dieron lugar a las variaciones de temperatura en la radiación cósmica de fondo de microondas de las que hablamos en el capítulo 3. Gracias a $E = mc^2$, esas fluctuaciones cuánticas de energía pueden manifestarse también como fluctuaciones cuánticas de masa: partículas, y sus compañeras antipartículas, que saltan a la existencia en un espacio por lo demás vacío. Eso pasa ahora mismo ante nuestros ojos, pero por muy atentamente que miremos, no encontraremos el menor indicio de que ocurra, porque la mecánica cuántica también dicta que esos pares partícula-antipartícula no tardan en encontrarse, aniquilarse y desvanecerse de nuevo en el espacio vacío. No obstante, podemos detectar señales indirectas de esas efímeras creaciones porque solo cuando las incluimos en nuestros cálculos conseguimos la extraordinaria concordancia entre predicciones y mediciones que, justificadamente, ha convertido la mecánica cuántica en la pieza central de la física fundamental[7].

Hawking reconsideró entonces estos mismos procesos cuánticos, pero imaginó que tenían lugar fuera del horizonte de sucesos de un agujero negro. Cuando un par partícula-antipartícula aparece en este medio, a veces las dos partículas se aniquilan al momento, igual que harían en cualquier otro lugar. Pero, y esto es lo importante, Hawking se dio cuenta de que a veces no se eliminan. En ocasiones, un miembro del par es absorbido por el agujero negro. La partícula que sobrevive, despojada ahora de una compañera con la que aniquilarse (y obligada a conservar el momento total), sale por piernas disparada hacia fuera. Como esto ocurre repetidamente en cada minúscula región del espacio que envuelve la superficie del horizonte de sucesos del agujero negro, este parecerá irradiar partículas en todas las direcciones; es lo que hoy conocemos como «radiación de Hawking».

Y lo que es más, de acuerdo con los cálculos, cada una de esas partículas que cae en el agujero negro tiene energía «negativa» (lo cual quizá no deba sorprendernos, puesto que la partícula del par que escapa al agujero negro tiene energía positiva, y la energía total debe conservarse). A medida que el agujero negro consume esas partículas de masa negativa, es como si engullese calorías negativas, y por lo tanto su masa disminuye en lugar de aumentar. Visto desde el exterior, el agujero negro se va encogiendo a medida que irradia partículas. De no ser porque la fuente de la radiación es exótica (un agujero negro inmerso en el baño cuántico de partículas fluctuantes inherente al espacio vacío), el proceso parecería de lo más prosaico, como un

resplandeciente trozo de carbón que irradia fotones al tiempo que lentamente se consume[8].

Del mismo modo que cuando un agujero negro se agranda (porque consume té caliente o porque engulle turbulentas estrellas) sigue al dedillo la segunda ley de la termodinámica, también cuando se encoge obedece la norma. Que el área del horizonte de sucesos de un agujero negro menguante se reduzca implica que su propia entropía disminuye, pero la radiación que emite el agujero negro hacia el exterior y sobre una región del espacio cada vez más extensa transfiere al entorno una porción de entropía más que compensatoria. La coreografía ya tiene que resultarnos familiar: al irradiar, los agujeros negros bailan el paso a dos de la entropía.

Las indagaciones de Hawking dieron forma matemática precisa a todas estas elucubraciones. Entre muchas otras cosas, este científico descubrió una fórmula precisa para calcular la temperatura de un agujero negro resplandeciente. Daré una explicación cualitativa de este resultado en la siguiente sección (quien sienta inclinación por la matemática encontrará la fórmula en las notas[9]), pero la característica más relevante para nosotros en este momento es que la temperatura es «inversamente» proporcional a la masa del agujero negro. De modo parecido a como los dogos alemanes son grandes y tranquilos mientras que los cachorros de shih tzu son menudos y maníacos, los agujeros negros grandes son fríos y sosegados, y los pequeños, calientes y frenéticos. Algunas cifras, por cortesía de la fórmula de Hawking, ilustran este enunciado. Para un agujero negro grande, como el que se encuentra en el centro de nuestra galaxia, con cuatro millones de veces la masa del Sol, la fórmula de Hawking sitúa su temperatura en el diminuto valor de una centésima de billonésima de grado por encima del cero absoluto (10^{14} kelvin). En un agujero negro más pequeño, con la misma masa que el Sol, la temperatura es más alta, pero lejos de ser agradable, se sitúa solo un pelo por debajo de una décima de millonésima de grado (10^{-7} kelvin). En cambio, un agujero negro diminuto, con la masa de una naranja, pongamos por caso, tendría la abrasadora temperatura de un billón de billones de grados (10^{24} kelvin).

Un agujero negro con una masa mayor que la Luna tiene una temperatura inferior a los 2,7 grados de la radiación cósmica de fondo que actualmente baña el cosmos. Este hecho en apariencia trivial, útil para una charla erudita en un cóctel, es en realidad una cifra de gran significación cosmológica. Como el calor fluye de manera espontánea de las temperaturas altas a las bajas, fluirá del gélido medio de radiación de fondo de microondas que

envuelve a ese agujero negro hacia el propio agujero negro. Y aunque este emite radiación de Hawking, tomará más calor de su entorno del que libera, y poco a poco irá aumentando su masa. Como hasta los más pequeños agujeros negros descubiertos hasta ahora mediante observaciones astronómicas son mucho más masivos que la Luna, todos andan camino de engordar. Sin embargo, a medida que el universo se expanda, la radiación de fondo de microondas seguirá diluyéndose y su temperatura seguirá enfriándose. Para todo agujero negro, en el futuro lejano llegará un momento en el que la temperatura de fondo del espacio caerá por debajo de la suya propia, y entonces la balanza de la energía se inclinará para el otro lado, el agujero negro comenzará a emitir más radiación de la que recibe y comenzará a encogerse.

En la plenitud de los tiempos, también los agujeros negros se desvanecerán.

Hay muchas preguntas sobre los agujeros negros que siguen en la vanguardia de la investigación contemporánea, y una de considerable importancia para nuestra discusión concierne a los últimos momentos de la existencia de estos. A medida que un agujero negro irradia, su masa disminuye y, por contra, su temperatura aumenta. ¿Qué ocurre cuando un agujero negro está a punto de desaparecer, cuando su masa se acerca a cero y su temperatura se dispara hacia el infinito? ¿Explota? ¿Chisporrotea y listo? ¿Hace alguna otra cosa? No lo sabemos. Aun así, el conocimiento cuantitativo de la radiación de Hawking permitió al físico Don Page determinar la tasa a la que se encoge un agujero negro determinado, y por tanto el tiempo que tardará en llegar a su momento final, sea como sea ese último suspiro[10]. Tomando la masa del Sol como representativa de los agujeros negros que se forman a partir de una estrella moribunda, los resultados de Page demuestran que hacia el piso 68 del Empire State Building, 10^{68} años después de la gran explosión, esos agujeros negros habrán emitido radiación hasta consumirse.

La desintegración de los agujeros negros extremos

Los agujeros negros que, según se cree, alojan en su interior la mayoría de las galaxias, si no todas, tienen masas gigantescas. A medida que avanzan las prospecciones astronómicas, cada récord es desbancado por el siguiente, y las

masas más grandes se acercan ya a cien mil millones de veces la masa solar. Un agujero negro con esa masa tiene un horizonte de sucesos tan grande que se extendería desde el Sol hasta más allá de la órbita de Neptuno, a un buen trecho de camino a la nube de Oort. A quien tenga un poco oxidado su conocimiento de Oort y su lejana nube, le bastará con saber que la luz del Sol tarda más de cien horas en alcanzarla, así que estamos hablando de un agujero negro decididamente gigantesco. Sin embargo, como explicaremos enseguida, el enorme tamaño de estos agujeros negros no nos deja ver su plácido talante.

De acuerdo con la teoría de la relatividad general, la receta para construir un agujero negro resulta bastante sencilla: basta con coger una cantidad de masa y formar con ella una bola de tamaño suficientemente pequeño[11]. Por supuesto, hasta el más somero conocimiento de los agujeros negros lleva a sospechar que «suficientemente» pequeño significa «realmente» pequeño, «espectacularmente» pequeño, «ridículamente» pequeño. Y en algunos casos esa expectativa da en el clavo. Para convertir un pomelo en un agujero negro, habría que comprimirlo hasta un diámetro de 10^{-25} centímetros; para transformar la Tierra en agujero negro, habría que encogerla hasta un diámetro de unos dos centímetros, y en el caso del Sol, habría que apretarlo hasta alcanzar un diámetro de seis kilómetros. Cada uno de estos ejemplos implica una fenomenal compresión de la materia, lo cual contribuye a la intuición, muy generalizada, de que para formar un agujero negro se necesita alcanzar una densidad fenomenal. Pero si continuamos catalogando ejemplos con masa superior a la del Sol, centrándonos en la formación de agujeros negros cada vez más grandes, descubrimos una pauta sorprendente.

A medida que aumenta la cantidad de materia usada para crear un agujero negro, la densidad a la que es necesario comprimirla «disminuye». Si el lector me permite un par de frases de estilo matemático, la razón resultará evidente: como el radio del horizonte de sucesos es proporcional a la masa del agujero negro, su volumen es proporcional al cubo de la masa y, por lo tanto, su densidad media (masa dividida por volumen) «disminuye» con el cuadrado de la masa. Si aumentamos la masa en un factor de dos, la densidad disminuye en un factor de cuatro; si aumentamos la masa en un factor de mil, la densidad cae en un factor de un millón. Matemática aparte, el mensaje es que para construir un agujero negro, cuanto mayor sea la masa, menos habrá que comprimirla. Para construir un agujero negro como el que hay en el centro de la Vía Láctea, cuya masa es unos cuatro millones de veces mayor que la del Sol, se necesita masa con una densidad unas cien veces superior a la del plomo, así que hace falta bastante compresión. Para hacer un agujero negro

con una masa cien millones de veces superior a la del Sol, la densidad necesaria se reduce a la del agua. Y para hacer un agujero negro con una masa cuatro mil millones de veces superior a la del Sol, basta con comprimir hasta una densidad parecida a la del aire que respiramos. Si pudiéramos recoger cuatro mil millones de veces la masa del Sol en aire, a diferencia de lo que pasaba con el pomelo, la Tierra o el Sol, para crear un agujero negro no tendríamos que comprimir el aire en absoluto. La acción de la gravedad sobre el aire bastaría por sí sola para crear un agujero negro.

No digo que las bolsas de aire sean una materia prima realista para crear agujeros negros supermasivos, pero el hecho de que uno con cuatro mil millones de veces la masa del Sol tenga una densidad media parecida a la del aire resulta más que curioso, es un ilustración reveladora de hasta qué punto pueden diferir sus propiedades de la idea popular que se tiene de ellos[12]. Gigantescos por su masa y tamaño, esos agujeros negros son delicados cuando nos fijamos en su densidad media, lo que sin duda los convierte en amables gigantes. En este sentido, los más grandes son menos extremos que los pequeños, y eso nos hace entender de manera más intuitiva el hallazgo de Hawking de que cuanto más masivo es un agujero negro, menor es su temperatura y más débil su resplandor.

La longevidad de los agujeros negros grandes se beneficia, pues, de dos factores que se encuentran relacionados: tienen más masa que irradiar y, a causa de su menor temperatura, irradian esa masa más lentamente. Si ponemos valores en las ecuaciones, hallamos que un agujero negro con una masa unos cien mil millones de veces mayor que la del Sol irá menguando a un ritmo tan sosegado que solo cuando alcancemos el último piso del Empire State Building, el piso 102, habrá emitido su última ráfaga de radiación para, finalmente, desvanecerse en la negrura[13].

Un fin del tiempo

Si observamos el universo desde el piso 102, no veremos mucho más que una neblina difusa de partículas que merodean por el espacio. Ocasionalmente, la atracción entre un electrón y su antipartícula, el positrón, los irá acercando siguiendo trayectorias espirales hasta que se aniquilen la una a la otra con un minúsculo destello, un ínfimo punto de luz que por un instante rasgará la

oscuridad. Si la energía oscura se ha agotado y la expansión rápida del espacio ha disminuido, es posible que se acumulen partículas en agujeros negros aún más grandes que irradien aún más despacio, y por lo tanto duren más tiempo. Pero si la energía oscura persiste, las partículas quedarán separadas cada vez más deprisa por la expansión acelerada, y por lo tanto solo se encontrarán muy raramente. Como curiosidad, las condiciones son un tanto afines a las que se dieron justo después del Big Bang, cuando el espacio también estaba poblado de partículas separadas. La diferencia es que en el universo primigenio las partículas estaban tan densamente empaquetadas que la gravedad podía empujarlas con facilidad a formar estructuras como las estrellas y los planetas, mientras que en el universo tardío estarán tan dispersas que la implacable expansión acelerada del espacio garantiza que la formación de agregados sea extremadamente improbable. Es una versión cósmica del polvo al polvo, en la que el polvo primigenio se encuentra en magníficas condiciones para bailar el paso a dos de la entropía y formar estructuras astronómicas con orden, mientras que en la edad provecta del universo el polvo estará tan diseminado que no podrá más que vagar sosegadamente por el vacío.

Los físicos suelen considerar que esta era futura constituye el fin del tiempo. Pero no porque este se pare. Cuando la acción no va más allá del paso de una partícula de un punto cualquiera de la vastísima extensión del espacio a otro punto cualquiera, es razonable concluir que el universo ha caído finalmente en el olvido. Sin embargo, nuestra intención en este capítulo es considerar duraciones muy dilatadas, y eso hace que cobren relevancia procesos tan improbables que en cualquier otro contexto los descartaríamos de inmediato. Aunque apenas podamos concebirlos, estos raros eventos podrían salpicar el olvido de posibilidades infrecuentes, pero de enorme alcance.

La desintegración del vacío

En una conferencia de prensa celebrada el 4 de julio de 2012 en el CERN, el Centro Europeo para la Investigación Nuclear, el portavoz Joe Incandela anunció el descubrimiento de la largamente esperada partícula de Higgs. Presencié la retransmisión en directo en el Centro de Física de Aspen, en un

sala repleta de colegas. Ocurrió hacia las dos de la madrugada. Todos gritamos de entusiasmo. La cámara enfocó a Peter Higgs, que se quitaba las gafas y las limpiaba. Higgs había propuesto la partícula que hoy lleva su nombre casi cincuenta años antes, se había enfrentado con éxito a la resistencia que a veces encuentran las nuevas ideas, y había tenido que esperar toda una vida para confirmar que tenía razón.

Durante un largo paseo por las afueras de Edimburgo, el joven Peter Higgs resolvió un enigma que había llevado de cabeza a investigadores de todo el mundo. Comenzaban a establecerse entonces las matemáticas que describen las fuerzas débil, fuerte y electromagnética, y las partículas de la materia sobre las que estas fuerzas influyen. Trabajando codo con codo, teóricos y experimentadores escribían un manual de mecánica cuántica que exponía el funcionamiento del micromundo. Pero había una flagrante omisión. Las ecuaciones no podían explicar cómo adquirían masa las partículas fundamentales. ¿Por qué cuando se empuja una partícula fundamental (como los electrones o los quarks), ofrece resistencia a nuestro esfuerzo? Esta resistencia refleja la masa de la partícula, pero las ecuaciones parecían contar una historia distinta: según la matemática, las partículas deberían carecer de masa y, por consiguiente, no deberían ofrecer la menor resistencia. Huelga decir que la discordancia entre realidad y las matemáticas enervaba a los físicos.

La razón de que las matemáticas permitieran solamente partículas sin masa es un pelín técnica, pero todo se reduce a una cuestión de simetría. Igual que la bola blanca del billar siempre tiene el mismo aspecto se mire por donde se mire, las ecuaciones que describen las partículas fundamentales tienen el mismo aspecto cuando se intercambia este término matemático por aquel otro. En cada caso, la insensibilidad al cambio (de orientación para la bola blanca y de reorganización matemática para las ecuaciones) refleja un elevado grado de simetría subyacente. En el caso de la bola blanca, la simetría garantiza que ruede con suavidad. En el caso de las ecuaciones, la simetría garantiza que el análisis matemático se desarrolle también suavemente. Como los investigadores de la física de partículas ya habían observado, sin simetría las ecuaciones serían incoherentes y producirían como resultado un sinsentido, de modo parecido a lo que ocurre cuando dividimos uno por cero. De ahí el enigma: el análisis reveló que la misma simetría matemática que garantiza unas ecuaciones sanas también requiere que las partículas carezcan de masa (lo cual quizá no sea tan sorprendente, puesto que el cero es en sí mismo un

número muy simétrico, que se mantiene firme en su valor cuando se multiplica o divide por otro número).

Aquí es donde intervino Higgs, quien argumentó que las partículas «carecen» de masa intrínsecamente, tal como exigen las ecuaciones simétricas prístinas, pero cuando aparecen en el mundo adquieren masa a través de una influencia del entorno. El físico británico concibió el espacio como si estuviera lleno de una sustancia invisible que hoy conocemos como «campo de Higgs», en el que las partículas, al ser empujadas contra él, experimentan una fuerza de fricción un tanto parecida a la que experimenta una bola de *wiffle* al volar por el aire[14]. Aunque una pelota de *wiffle* casi no pesa nada, si sostenemos una por fuera de la ventana de un coche que acelera, la mano y el brazo notan el esfuerzo: la bola parece tener una masa mucho mayor porque se abre paso contra la resistencia que ejerce el aire. De manera parecida, el físico propuso que cuando se empuja una partícula, parece masiva porque se desplaza contra la resistencia que ejerce el campo de Higgs. Cuanto más pesada es una partícula, más se resiste al empuje, lo que según el científico significa que experimenta una resistencia mayor del campo que impregna todo el espacio[15].

Al lector que no esté familiarizado con el campo de Higgs, pero que haya leído con atención los capítulos anteriores, el planteamiento no le resultará especialmente extraño. La física moderna se ha acostumbrado a la idea de sustancias invisibles que impregnan el espacio, versiones nuevas del antiguo éter. Desde el campo del inflatón, que podría haber impulsado el Big Bang, a la energía oscura, que podría ser responsable de la expansión acelerada del universo que hoy medimos, los físicos de las últimas décadas no han recelado de la suposición de que el espacio pueda estar ocupado por algo invisible. En la década de 1960, sin embargo, esa idea era radical. Lo que Higgs sugería era que si el espacio estuviese realmente vacío en el sentido convencional e intuitivo, las partículas no poseerían masa en absoluto. En consecuencia, concluyó que el espacio no debe estar vacío, y la peculiar sustancia que alberga debe ser la adecuada para inducir masa en las partículas.

El primer artículo en el que Higgs defendió esta nueva proposición fue rechazado sin mayores miramientos. «Me dijeron que lo que decía eran tonterías», comentó Higgs, recordando la reacción[16]. Pero quienes estudiaron la idea con detenimiento comprendieron sus méritos y poco a poco fue ganando adeptos. Con el tiempo, fue aceptada plenamente. Mi primer encuentro con la propuesta de Higgs fue durante un curso de doctorado en la

década de 1980, y nos la presentaron con tal certitud que me llevó un momento comprender que todavía esperaba confirmación experimental.

La estrategia para testar la proposición es tan fácil de explicar como difícil de realizar. Cuando dos partículas, por ejemplo dos fotones, chocan a alta velocidad, la colisión debería perturbar el campo de Higgs. Esto, teóricamente, debería liberar en algunas ocasiones un pedacito minúsculo del campo, que se manifestaría como una nueva partícula, la «partícula de Higgs», o, en la expresión del premio Nobel Frank Wilczek, «una astilla del viejo vacío». Por consiguiente, la observación de esa partícula proporcionaría un indicio indirecto de la teoría, una meta que inspiró más de treinta años de investigación de más de tres mil científicos de más de tres docenas de países, con la ayuda del más potente acelerador de partículas del mundo, y con un coste superior a quince mil millones de dólares. La conclusión de esa odisea, anunciada en aquella conferencia de prensa del Día de la Independencia, se manifestó como un minúsculo pico en un gráfico por lo demás plano producido a partir de los datos recogidos en el Gran Colisionador de Hadrones: era la confirmación experimental de que se había detectado la partícula de Higgs.

Es un soberbio episodio de los anales de los descubrimientos realizados por la humanidad que ahonda en nuestro conocimiento de las propiedades de las partículas y reafirma nuestra confianza en la capacidad de las matemáticas para desvelar aspectos ocultos de la realidad. La relevancia de todo esto para nuestro viaje a lo largo de la línea de tiempo cósmica se debe a una consideración relacionada pero distinta, la de que el valor del campo de Higgs podría cambiar en algún momento del futuro. De modo parecido a como la resistencia que experimenta una bola de *wiffle* cambiaría si lo hiciera también la densidad del aire, las masas de las partículas fundamentales cambiarían si el valor del campo de Higgs fuese diferente. Salvo que fuese realmente minúsculo, casi con seguridad, ese cambio destruiría la realidad tal como la conocemos. Los átomos y moléculas, y las estructuras que estas erigen, dependen íntimamente de las propiedades de sus constituyentes particulares. El Sol brilla gracias a la física y química del hidrógeno y el helio, y estos dependen de las propiedades de protones, neutrones, electrones, neutrinos y fotones. Las células hacen lo que hacen gracias sobre todo a la física y química de sus constituyentes moleculares, que a su vez dependen de las propiedades de las partículas fundamentales. Si se modifican las masas de estas últimas, cambia su comportamiento, y con ello, prácticamente todo.

Un gran número de experimentos de laboratorio y observaciones astronómicas han dejado establecido que durante todos o casi todos los últimos 13 800 millones de años, las masas de las partículas fundamentales se han mantenido constantes, y por lo tanto el valor del campo de Higgs ha permanecido estable. Sin embargo, basta con que exista la más ínfima probabilidad de que el campo de Higgs pueda saltar en el futuro a un valor distinto para que esa probabilidad se amplifique hasta casi una certeza a causa de las enormes duraciones que estamos considerando.

La física relevante para un salto de Higgs es lo que se conoce como «efecto túnel» (o «túnel cuántico»), un proceso que se comprende mejor si primero se considera dentro de un contexto más sencillo. Imaginemos que colocamos una canica en una copa de flauta para champán. Si nadie la perturba, esperamos que la canica se quede dentro. Al fin y al cabo, está rodeada de altas barreras de vidrio y carece de la energía suficiente para subir por las paredes de la copa y escapar por la boca. Tampoco tiene la energía suficiente para penetrar y atravesar directamente el vidrio. De modo parecido, si colocamos un electrón en un trampa con la forma de una diminuta copa de flauta, cercado por todos los lados por barreras, esperaríamos que también se quedase donde está. De hecho, eso es lo que hacen los electrones la mayor parte del tiempo. Pero a veces no. A veces el electrón desaparece de la trampa y se rematerializa en el otro lado.

Por mucho que nos sorprenda este acto de escapismo, que parece más propio de Houdini, en la mecánica cuántica es de lo más normal. Con la ecuación de Schrödinger podemos calcular la probabilidad de que un electrón se encuentre en uno y otro lugar, por ejemplo el interior y el exterior de la trampa. La matemática nos enseña que cuanto más imponente sea la trampa (más gruesos y altos los muros), menor es la probabilidad de que el electrón se escape. Sin embargo, y esta es la clave, para que la probabilidad sea cero la trampa tendría que ser infinitamente ancha o infinitamente alta, y en el mundo real eso no ocurre. Una probabilidad mayor que cero, por pequeña que sea, implica que, dado el tiempo suficiente, el electrón «acabará por pasar» al otro lado. Las observaciones confirman que así es. Este tránsito a través de una barrera es lo que llamamos «efecto túnel».

He descrito este efecto refiriéndome a una partícula que atraviesa una barrera, y cambia por tanto su ubicación de un punto a otro, pero también puede involucrar un campo que penetra una barrera y su valor. Y este proceso, si implica el campo de Higgs, puede determinar el destino del universo a largo plazo.

En las unidades que los físicos utilizan por convención, el valor actual del campo de Higgs es 246[17]. ¿Por qué 246? Nadie lo sabe. Pero la resistencia que ofrece el campo de Higgs con este valor (junto con la forma precisa en que cada partícula interactúa con él) explica a satisfacción las masas de las partículas fundamentales. Pero ¿por qué el valor de Higgs se ha mantenido estable durante miles de millones de años? La respuesta, según creemos, es que, como la canica en la copa de flauta o el electrón en la trampa, se encuentra cercado por todos los lados por barreras imponentes: si el campo de Higgs intentase migrar de 246 a un valor más alto o más bajo, la barrera lo obligaría a regresar a su valor original de modo parecido a como la canica se ve forzada a volver al fondo de la copa después de que alguien la sacuda. Además, de no ser por consideraciones cuánticas, el valor de Higgs se mantendría en 246 de manera permanente. Pero, como Sidney Coleman descubrió a mediados de la década de 1970, el túnel cuántico lo cambia todo[18].

Del mismo modo que la mecánica cuántica permite que un electrón ocasionalmente se evada de una trampa por un túnel cuántico, también permite que lo haga el valor del campo de Higgs. Si esto ocurriese, este último no cambiaría en todo el espacio de manera simultánea, sino que en alguna minúscula región, que solo cobraría protagonismo por el azar de los sucesos cuánticos, traspasaría la barrera por efecto túnel y cambiaría su valor a otro distinto. Entonces, igual que si una canica que atravesase una copa por efecto túnel caería a una altura inferior, el valor del campo de Higgs caería también a una energía inferior. Pero esa seductora menor energía llevaría al campo de Higgs circundante a realizar también la transición, un efecto dominó que produciría una esfera cada vez mayor dentro de la cual el valor de Higgs habría cambiado.

En el interior de la esfera, este nuevo valor provocaría un cambio en las masas de las partículas, de modo que allí las características que hoy conocemos de la física, química y biología perderían validez. Fuera de la esfera, donde el valor de Higgs todavía no habría cambiado, las partículas retendrían sus propiedades habituales y todo parecería normal. El análisis de Coleman reveló que la frontera de esta esfera, que marca la transición del viejo al nuevo valor de Higgs, se expandiría hacia fuera a una velocidad cercana a la de la luz[19]. Eso quiere decir que a los que estuviésemos fuera nos sería virtualmente imposible ver cómo se acerca ese muro de la perdición. Para cuando lo avistásemos, lo tendríamos encima. En un momento todo sería como siempre, y al instante siguiente todo dejaría de ser. ¿Es posible que en

este dominio de partículas con características novedosas acaben formándose nuevas estructuras y, quién sabe, hasta nuevas formas de vida? Posiblemente. Pero por el momento estas preguntas se encuentran fuera de nuestro alcance.

Los físicos no pueden decir cuándo podría dar el salto el campo de Higgs. Esa escala de tiempo depende de propiedades de las partículas y las fuerzas que todavía no hemos podido determinar con la precisión suficiente. Además, en tanto que proceso cuántico, solo puede predecirse de manera probabilística. Los datos actuales sugieren que el campo de Higgs podría atravesar ese túnel cuántico hacia un valor diferente de 10^{102} a 10^{359} años desde el presente, o sea, en algún punto entre los pisos 102 y 359 (una horquilla que cae fuera del alcance no ya del Empire State Building, sino incluso del Burj Khalifa[20]).

Como el campo de Higgs redefine el significado del vacío (el más vacío de los vacíos del universo observable todavía contiene un campo de Higgs con un valor de 246), el efecto túnel aplicado al valor de este campo revela una inestabilidad en el propio espacio. Si se espera el tiempo suficiente, hasta el espacio vacío cambia. Aunque la escala de tiempo para ese cambio, para esa desintegración, no da motivos para acongojarse, conviene recordar que existe la probabilidad de que ese efecto túnel se produzca hoy mismo. O mañana. Tal es la carga que soportamos por vivir en un universo cuántico en el que los eventos futuros están regidos por la probabilidad. Igual que podemos tirar al aire cien monedas y que todas salgan cara (posible, pero improbable), podríamos estar en ciernes de ser aplastados por un muro de un campo de Higgs alterado que lleve tras de sí una nueva variedad de espacio vacío. Posible, pero también improbable.

Que esta probabilidad sea minúscula puede parecer bueno. Aunque rápido e indoloro, morir barrido por un muro de la perdición que avanza a la velocidad de la luz es algo que la mayoría de nosotros preferiríamos evitar. Sin embargo, al dirigir la atención a escalas de tiempo aún más largas nos encontraremos con procesos cuánticos que no solo son extraños, sino que además tienen la capacidad de socavar todo lo que consideramos cierto sobre la realidad. Por ello, algunos físicos han cultivado cierta predilección por las teorías en las que el universo acaba mucho antes de que tengamos que enfrentarnos a la implosión del propio pensamiento racional.

Cerebros de Boltzmann

Durante nuestro ascenso por la línea del tiempo hemos presenciado la segunda ley de la termodinámica en acción. Desde el Big Bang a la formación de las estrellas, el origen de la vida, los procesos de la mente, el agotamiento de las galaxias y, finalmente, la desintegración de los agujeros negros, la entropía no ha hecho más que aumentar. Este crecimiento constante puede oscurecer la realidad de que el dictado de la segunda ley es probabilístico. La entropía «puede» disminuir. Las partículas del aire que en este momento están esparcidas por nuestra habitación «pueden» agregarse de manera simultánea en una bola que se cierna cerca del techo, dejándonos sin aliento. Es tan improbable, y la escala de tiempo para que ocurra es de tal envergadura, que reconocemos la posibilidad pero sabiamente seguimos con nuestras vidas. Ahora, sin embargo, mirando muy lejos, debemos dejar a un lado nuestro localismo temporal y considerar ciertas posibilidades asombrosas que conducirían a una reducción de la entropía.

Imaginemos que llevamos una hora leyendo este libro, sentados en nuestro sillón preferido, sorbiendo un té en nuestra taza preferida. Si alguien nos preguntase cómo hemos llegado a esta acogedora disposición de las cosas, diríamos que la taza se la compramos a un alfarero de Nuevo México, que el sillón lo heredamos de la abuela paterna y que siempre nos ha interesado conocer cómo funciona el universo, y por eso este libro. Si nos animasen a dar más detalles, hablaríamos quizá de cómo crecimos y nos educamos, de nuestros hermanos, padres, etc. Si nos piden que aún nos esforcemos más por remontarnos al pasado y explicar una historia más completa, tal vez acabásemos hablando justamente de lo que tratan los capítulos anteriores de este libro.

Todo esto se basa en un hecho curioso: todo lo que sabemos refleja pensamientos, recuerdos y sensaciones que «actualmente» residen en nuestro cerebro. La compra de la taza pasó hace tiempo. Lo que queda es una configuración de partículas del interior de nuestra cabeza que guarda ese recuerdo. Lo mismo puede decirse de los recuerdos de heredar el sillón de la abuela, de tener curiosidad por el universo y de haber leído sobre varios conceptos en este libro. Desde una perspectiva fisicalista férrea, todo eso se encuentra ahora mismo en nuestro cerebro gracias a la particular disposición de las partículas que ahora mismo conforman nuestra cabeza. Y eso significa

que si un conjunto de partículas al azar que viajan por el vacío de un universo de alta entropía y carente de estructuras cayera, de manera fortuita, en una configuración de menor entropía que coincidiera exactamente con la de las partículas que actualmente constituyen nuestro cerebro, esa colección de partículas tendría los mismos recuerdos, pensamientos y sensaciones que nosotros. En honor a su persona o como reproche, no lo sé muy bien, esas hipotéticas mentes que flotarían en libertad tras formarse por la unión espontánea, insólita pero posible, de partículas en una configuración especial y altamente ordenada se conocen como «cerebros de Boltzmann»[21].

Solo en la gélida negrura del espacio, un cerebro de Boltzmann no podría pensar muchos pensamientos antes de expirar. Pero una unión espontánea de partículas también podría proveer accesorios que prolongasen su función: una cabeza y un cuerpo donde alojarse, un suministro de agua y alimento, una estrella y un planeta apropiados, por mencionar algunos. De hecho, una unión espontánea de partículas (y campos) podría producir el universo entero de este mismo día o recrear las condiciones que desencadenaron el Big Bang, lo que permitiría que se desarrollase de nuevo un universo muy parecido al nuestro[22]. Sin duda, cuando se trata de una caída espontánea de la entropía, las probabilidades se inclinan de manera abrumadora a favor de caídas más modestas: menos partículas reunidas en estructuras más tolerantes a ordenaciones imprecisas. Y con lo de abrumadoramente favorecidas, lo que quiero decir es «abrumadoramente» favorecidas. Exponencialmente favorecidas. Y como ahora lo que en realidad nos interesa es el futuro lejano del pensamiento, un solo cerebro de Boltzmann es la formación de partículas mínima y, por lo tanto, más probable que pueda brevemente celebrar su existencia y, en consecuencia, preguntarse cómo diablos llegó a ser[23].

Lo que convierte todo esto en algo más que el principio de una trama de ciencia ficción de serie B es que en el futuro lejano parecen darse las condiciones adecuadas para que puedan producirse procesos tan insólitos. Un ingrediente esencial es la expansión acelerada del espacio. Ya hemos comentado con anterioridad que esa expansión daría lugar a un horizonte cosmológico, una lejana esfera envolvente que marcaría la frontera tras la cual los objetos se alejan de nosotros a una velocidad superior a la de la luz, cortando toda posibilidad de contacto o influencia. Ahora bien, del mismo modo que Hawking mostró que la mecánica cuántica implica que el horizonte de un agujero negro tiene temperatura y emite radiación, tanto él como su colaborador Gary Gibbons usaron un razonamiento parecido para mostrar que un horizonte cosmológico también tiene temperatura y emite radiación.

Nuestro análisis del capítulo anterior sobre el futuro del pensamiento se basaba en este mismo hecho, y llegábamos entonces a la conclusión de que la minúscula temperatura de nuestro horizonte cosmológico, de unos 10^{-30} kelvin, podría provocar que las futuras Pensadoras, obcecadas en seguir pensando de manera indefinida, acabasen quemándose en sus propios pensamientos. Como veremos a continuación, en el curso de escalas de tiempo mucho más largas unas argumentaciones parecidas brindan al futuro del pensamiento el potencial de un curioso resurgimiento.

En el futuro lejano, la radiación emitida por el horizonte cosmológico proporcionará una fuente tenue pero constante de partículas (en su mayoría sin masa, fotones y gravitones) que merodearán por la región del espacio que envuelve el horizonte. De vez en cuando, algunos grupos de estas partículas colisionarán y, por virtud de $E = mc^2$, transmutarán su energía de movimiento en la producción de un número inferior de partículas más masivas, como electrones, quarks, protones, neutrones y sus antipartículas. Como el resultado es menos partículas y menos movimiento, estos procesos reducen la entropía, pero si se espera el tiempo suficiente, por improbables que sean esos eventos, sucederán. Y seguirán sucediendo. De forma todavía más infrecuente, algunos de los protones, neutrones y electrones así producidos se moverán en la dirección precisa para unirse en partículas atómicas de alguna especie. La enorme duración requerida para esos rarísimos procesos explica por qué son irrelevantes para la síntesis de núcleos atómicos después del Big Bang o dentro de las estrellas. Ahora, con tiempo ilimitado, cobran importancia. Dado un tiempo todavía más dilatado, los átomos se reunirán al azar en configuraciones todavía más complejas, de modo que de vez en cuando, camino de la eternidad, una colección de partículas se agregará en tal o cual estructura macroscópica, desde una muñeca hasta un Bentley. En ausencia de entes pensantes, todas estas estructuras aparecerán y desaparecerán sin que nadie se entere. Pero cada cierto tiempo la estructura macroscópica que se formará será un cerebro, y entonces el pensamiento, extinguido durante tanto tiempo, resurgirá por un instante.

¿Cuál es la escala temporal de esa resurrección? Un cálculo aproximado (que los entusiastas de las matemáticas encontrarán en las notas[24]), nos permite estimar que hay una probabilidad razonable de que se forme un cerebro de Boltzmann durante los próximos $10^{10^{68}}$ años. Eso es muchísimo tiempo. Mientras que la duración representada por la punta del Empire State Building, 10^{102} años (un 1 seguido de 102 ceros), se puede escribir en línea y media, para escribir $10^{10^{68}}$ (que es un 1 seguido de 10^{68} ceros) tendríamos

que reemplazar por un cero cada carácter de cada página de cada libro impreso en cualquier momento de la historia y apenas haríamos mella. En cualquier caso, tampoco es que vaya a haber nadie aguardando, mirando el reloj a la espera de la caída entrópica que produzca un cerebro. El universo podría persistir durante casi una eternidad en un estado ordinario de desorden y alta entropía, y nadie se quejaría.

En cualquier caso, esto suscita una cuestión interesante y un tanto personal. ¿De dónde viene nuestro cerebro? La pregunta parece tonta, pero voy a pedir que se me siga el juego. Para responderla, uno naturalmente resigue sus recuerdos y conocimientos para explicar que nació con un cerebro, que su principio forma parte de una secuencia que puede rastrear a lo largo de un linaje ancestral, a lo largo del registro evolutivo de la vida, a través de la formación de la Tierra, el Sol y demás astros, y así hasta el Big Bang. A primera vista, parece tener sentido. La mayoría de nosotros daríamos alguna versión parecida de esta misma respuesta. Sin embargo, tal como los capítulos previos han puesto de manifiesto, la ventana de tiempo durante la cual pueden formarse cerebros del modo que hemos explicado es bastante limitada; siendo generosos, se extiende entre los pisos 10 y 40 del Empire State Building. La ventana de tiempo para la formación de cerebros al estilo boltzmanniano es incomparablemente más larga, y bien podría ser ilimitada[25]. A medida que el tiempo sigue su curso, los cerebros de Boltzmann seguirán conformándose de forma infrecuente pero segura, de manera que el número total de esos cerebros será cada vez mayor. Un recuento a lo largo de un período lo bastante dilatado revelaría que la población total de cerebros de Boltzmann excede en mucho la de cerebros tradicionales. Lo mismo puede decirse si nos centramos solo en aquellos cerebros de Boltzmann cuyas configuraciones de partículas imprimen la creencia errónea de que surgieron a la manera biológica tradicional. Una vez más, por raro que sea un proceso, durante un período de tiempo arbitrariamente largo ocurrirá un número arbitrariamente grande de veces.

Si entonces nos preguntamos a nosotros mismos acerca de la manera más probable en que adquirimos las creencias, recuerdos, conocimiento y entendimiento que en la actualidad poseemos, la respuesta desapasionada, basada en los grandes números, está clara: mi cerebro acaba de formarse de manera espontánea a partir de partículas en el vacío, con todos sus recuerdos y otras cualidades neuropsicológicas impresas en la particular configuración de las partículas. La historia que contamos sobre nuestro origen es emotiva, pero falsa. Nuestros recuerdos y las diversas cadenas de razonamientos que

nos han conducido a nuestro conocimiento y creencias son todos ficticios. No tenemos pasado. Acabamos de acaecer, existimos como un cerebro incorpóreo dotado de pensamientos y recuerdos de cosas que nunca ocurrieron[26].

Más allá de su absoluta extrañeza, esta posibilidad acarrea una conclusión devastadora, la razón misma de que me haya centrado en cerebros de origen espontáneo y no en la miríada de objetos inanimados que pueden formarse también por agregación aleatoria de partículas. Si un cerebro, ya sea el mío, el del lector, el de cualquiera, no puede fiarse de que sus recuerdos y creencias sean un reflejo fiel de sucesos que acaecieron, entonces ningún cerebro puede fiarse de las supuestas mediciones y observaciones y cálculos que constituyen la base del conocimiento científico[27]. Recuerdo aprender la relatividad general y la mecánica cuántica, puedo repasar la cadena de razonamientos que respalda estas teorías, puedo recordarme a mí mismo examinando los datos y observaciones que estas teorías explican de forma tan precisa, y así sucesivamente. Pero si no puedo confiar en que esos pensamientos sean reflejo de los eventos reales a los que los atribuyo, no puedo confiar en que las teorías sean más que productos de la mente, y por lo tanto no puedo fiarme de ninguna de las conclusiones a las que apuntan esas teorías. Lo chocante es que entre esas conclusiones, que ya no son de fiar, se encuentra la posibilidad de que yo sea un cerebro espontáneamente creado que flota en medio del vacío. El profundo escepticismo que suscita la posibilidad de la formación espontánea de cerebros nos obliga a ser escépticos acerca del propio razonamiento que de buen principio nos ha llevado a considerar esa posibilidad.

En suma, las infrecuentes caídas espontáneas de la entropía que las leyes de la física permiten pueden trastocar nuestra confianza en las propias leyes y en todo lo que supuestamente implican. Cuando consideramos la actuación de las leyes durante períodos de tiempo arbitrariamente largos, nos sumergimos en una pesadilla de escepticismo que trastorna nuestra confianza en todo, y ese no es un buen lugar donde estar. ¿Cómo podemos entonces recobrar la confianza en los cimientos del pensamiento racional que nos ha permitido ascender con brío todo el Empire State Building y aún más alto? Los físicos han desarrollados varias estrategias.

Algunos llegan a la conclusión de que los cerebros de Boltzmann son mucho ruido y pocas nueces. Desde esta perspectiva, no se pone en duda que puedan formarse cerebros de Boltzmann. Pero podemos estar tranquilos: nosotros, seguro, no somos uno de ellos. Como prueba basta con mirar al

mundo y asimilar todo lo que vemos. Si yo fuese un cerebro de Boltzmann, lo más probable (abrumadoramente probable) es que un instante más tarde deje de existir. Un cerebro que perdura más tiempo debe formar parte de un sistema de apoyo más grande y más ordenado, y por lo tanto requiere una fluctuación aún más rara hasta una entropía mucho más pequeña, lo cual significa que su formación es mucho más improbable. Así pues, si nuestra segunda mirada al mundo se parece mucho a la primera, la confianza en que no somos un cerebro de Boltzmann aumenta. De hecho, según esta perspectiva, cada nuevo momento parecido al anterior refuerza el argumento y acrecienta la confianza.

Cabe notar, sin embargo, que el argumento supone que cada uno de los momentos de esa secuencia es, en el sentido convencional, real. Si ahora mismo tengo el recuerdo de haber mirado el mundo una docena de veces durante el último minuto, asegurándome repetidamente de que no soy un cerebro de Boltzmann, ese recuerdo refleja el estado de mi cerebro en el momento presente y por lo tanto es compatible con la posibilidad de que mi cerebro haya llegado a acaecer justo en este instante y con esos recuerdos precisos impresos. Llevado a sus últimas consecuencias, este escenario nos hace comprender que las observaciones empíricas que acabamos de usar para argumentar que no somos un cerebro de Boltzmann pueden ser, también ellas, parte de la ficción. Puedo albergar el recuerdo de decirme a mí mismo «Pienso, luego existo», pero visto desde un momento dado, el enunciado correcto me obliga a decir «Pienso que pensé, luego pienso que existí». El recuerdo de unos pensamientos no nos garantiza que estos hayan ocurrido alguna vez.

Un enfoque más convincente consiste en negar la propia posibilidad. Un aspecto central del argumento de los cerebros de Boltzmann es la existencia de un lejano horizonte cosmológico que continuamente irradia partículas, que son la materia prima para la construcción de estructuras complejas, incluida la mente. A largo plazo, si la energía oscura que llena el espacio acabase por disiparse, la expansión acelerada cesaría y desaparecería el horizonte cosmológico. Sin una lejana superficie envolvente que irradie partículas, la temperatura del espacio se aproximaría a cero, y con ello también la probabilidad de que se formen estructuras macroscópicas complejas de manera espontánea. No disponemos hasta el momento de ningún indicio del debilitamiento (o fortalecimiento) de la energía oscura, pero en futuras misiones de observación se estudiará esa posibilidad con mayor precisión. Lo prudente es concluir que esta cuestión todavía espera sentencia[28].

Más radicales todavía son las perspectivas que consideran que el universo, o por lo menos el universo que conocemos, no existirá durante un futuro arbitrariamente lejano. Y si no contamos con las duraciones extraordinariamente largas que hemos venido considerando, la probabilidad de que se formen cerebros de Boltzmann es tan pequeña, tan ridícula, que podemos ignorarla sin perder más sueño. Si el universo llegase a su fin mucho tiempo antes de los períodos que harían probable la producción de cerebros de Boltzmann, podríamos dejar a un lado nuestro escepticismo y regresar con comodidad a nuestro relato anterior sobre el origen y desarrollo de nuestros cerebros, incluidos nuestros recuerdos, conocimiento y creencias[29].

¿Cómo podría producirse ese rápido fin del universo?

¿Está cerca el fin?

Antes consideramos la posibilidad de que el campo de Higgs diera un salto cuántico hacia un nuevo valor y que eso provocase un cambio súbito de las propiedades de las partículas que reescribiera muchos de los procesos básicos de la física, la química y la biología. El universo seguiría su curso, pero casi con certeza sin nosotros. Si esta divergencia se produjese mucho antes de las escalas de tiempo necesarias para la formación de cerebros de Boltzmann (como en la actualidad sugieren los datos sobre el campo de Higgs), los cerebros ordinarios predominarían en la población, y eludiríamos el atolladero del escepticismo[30].

Un fin aún más enfático sería el provocado por un salto cuántico en el que cambiase súbitamente el valor de la energía oscura. En la actualidad, la expansión acelerada del cosmos es empujada por una energía oscura positiva que impregna todas las regiones del espacio. Pero del mismo modo que la energía oscura positiva produce gravedad repulsiva que empuja hacia fuera, la energía oscura negativa genera gravedad atractiva que tira hacia dentro. En consecuencia, un evento de efecto túnel en el que la energía oscura saltase a un valor negativo marcaría una transición de un universo que se hincha a uno que se colapsa. Ese cambio radical haría que todo, la materia, la energía, el espacio y el tiempo, se comprimiera hasta alcanzar una extraordinaria presión y temperatura, una suerte de Big Bang inverso que los físicos han bautizado como Big Crunch (gran implosión[31]). Del mismo modo que hay

incertidumbre sobre qué ocurrió en el tiempo cero, cuando se desencadenó el Big Bang, hay incertidumbre también acerca de lo que sucedería en el momento final, en el momento último del colapso. Lo que es evidente, sin embargo, es que si la implosión se produjese mucho antes de los 10^{1068} años, la peculiar implicación de los cerebros de Boltzmann dejaría una vez más de tener sentido.

En una última perspectiva, interesante más allá de las consideraciones sobre los cerebros de Boltzmann, el físico Paul Steinhardt y sus colaboradores Neil Turok y Anna Ijjas imaginan que a esa potencial implosión que pondría fin al universo le seguiría un optimista rebote que produciría un nuevo universo[32]. De acuerdo con esta teoría, las regiones del espacio como la nuestra pasan por fases de expansión y contracción en ciclos que se repiten indefinidamente. El Big Bang se convierte en el Big Bounce, el gran rebote, en un rebote desde un anterior período de contracción. La idea no es del todo nueva. Poco después de que Einstein completase la teoría de la relatividad general, Alexander Friedmann propuso una versión cíclica de la cosmología que refinaría después Richard Tolman[33]. El objetivo de Tolman, en particular, era eludir la cuestión del origen del universo. Si los ciclos se extienden infinitamente hacia el pasado, entonces no hubo principio. El universo siempre existió. Pero Tolman topó con el obstáculo de la segunda ley de la termodinámica. La continua acumulación de entropía de un ciclo al siguiente implica que el universo que habitamos hoy día solo podría existir precedido por un número finito de ciclos, con lo cual se requería un inicio después de todo. En su nueva versión del cosmos cíclico, Steinhardt e Ijjas dicen poder superar ese obstáculo al establecer que, en cada ciclo, una región determinada del espacio se expande mucho más de lo que se contrae, garantizando así que la entropía que contiene queda totalmente diluida. Ciclo tras ciclo, la entropía total del conjunto del espacio aumenta, de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica, pero en cualquier región finita, como la que dio origen a nuestro cosmos observable, la acumulación de entropía que se alzó como un obstáculo para Tolman deja de ser un problema. La expansión diluye toda la materia y la radiación, y la posterior contracción aprovecha la gravedad para rellenar justo la cantidad de energía de alta calidad necesaria para iniciar un nuevo ciclo. La duración de cada ciclo viene determinada por el valor de la energía oscura; de acuerdo con las mediciones actuales, sería del orden de cientos de miles de millones de años. Como eso es mucho menos tiempo del necesario para que se formen cerebros de Boltzmann, la cosmología cíclica proporciona una nueva solución potencial

para preservar la racionalidad. Durante cada ciclo habría tiempo de sobra para producir cerebros de la forma ordinaria, pero concluiría mucho antes de que hubiera tiempo para producir cerebros a la manera boltzmanniana. Con una razonable seguridad, todos podríamos declarar entonces que nuestros recuerdos reflejan sucesos que realmente ocurrieron.

Mirando hacia el futuro, la cosmología cíclica sugiere que nuestro ascenso por el Empire State Building se acabaría pronto, alrededor de los pisos 11 o 12, cuando la fase de contracción del espacio daría lugar a un rebote que pondría fin a nuestro ciclo e iniciaría el siguiente. La linealidad de la metáfora del rascacielos también habría que actualizarla a una forma espiral (me viene a la mente una versión del Museo Guggenheim de Nueva York que se elevase hacia el cielo), en la que cada vuelta representase un ciclo cosmológico. Además, como los ciclos podrían sucederse de manera indefinida tanto hacia el pasado como hacia el futuro, habría que imaginar que la estructura se extiende infinitamente lejos en ambas direcciones. La realidad que conocemos formaría parte de una sola vuelta de ese recorrido cosmológico.

En años recientes, la cosmología cíclica se ha alzado como principal competidora de la teoría inflacionaria. Aunque ambas pueden explicar las observaciones cosmológicas, y entre ellas las tan importantes variaciones de la radiación de fondo de microondas, esta hipótesis sigue dominando la investigación cosmológica. Esto refleja en parte lo arduo que es despertar el interés de los físicos por alternativas a una teoría que durante cuatro décadas ha impulsado la cosmología hasta convertirla en una ciencia madura y precisa. Que nuestros tiempos se conozcan como la era dorada de la cosmología se debe atribuir en buena medida a la teoría de la inflación cósmica. Pero en la ciencia, como es natural, la verdad no se determina por encuestas y popularidad, sino por experimentos, observaciones e indicios empíricos. Y las teorías inflacionaria y cíclica producen una predicción observacional marcadamente distinta que algún día nos será de gran utilidad para dirimir entre ellas: el destello de expansión inflacionaria del Big Bang debió perturbar de forma tan vigorosa el tejido del espacio que las ondas gravitacionales producidas podrían llegar a detectarse todavía. En cambio, bajo el modelo cíclico, la expansión más suave habría generado ondas gravitacionales demasiado débiles como para que podamos observarlas. En un futuro no muy lejano, las observaciones podrían ofrecernos la posibilidad de inclinar la balanza hacia una de las dos aproximaciones cosmológicas[34].

Entre los investigadores, la teoría inflacionaria sigue siendo la principal teoría cosmológica, y por eso nos hemos centrado en ella en los capítulos

anteriores. En cualquier caso, es emocionante imaginar que futuras observaciones nos permitan profundizar en nuestro conocimiento del cosmos y nos lleven a ver nuestra era como uno de muchos momentos, quizá infinitos, de entendimiento incompleto. Aunque eso afectaría a nuestra discusión de los primeros estadios del universo, así como su desarrollo por encima del piso 12, más o menos, las consideraciones centrales sobre la entropía y la evolución que nos han guiado en nuestro viaje todavía se mantendrían en pie. Si se confirmase la teoría cíclica, la consecuencia de mayor impacto sería descubrir que la más ubicua de todas las pautas (nacimiento, muerte, renacimiento) es recapitulada también a escala cosmológica. Es un modelo sugerente. Pensadores que se remontan a los antiguos hindúes, egipcios y babilonios ya imaginaron que en lugar de principio, medio y final, el universo, como los días y las estaciones, podría responder a una pauta de ciclos sucesivos. En un futuro no muy lejano, datos recogidos por los observatorios de ondas gravitacionales podrían revelarnos si es esta la pauta que sigue el cosmos[35].

Pensamiento y multiverso

¿Un viaje a velocidad arbitraria hacia lo más profundo del espacio alcanzaría sus confines? ¿Continuaría para siempre? ¿O daría una vuelta entera cual cósmico periplo magallánico? Nadie lo sabe. Dentro de la teoría inflacionaria, las formulaciones matemáticas que se han estudiado más a fondo nos llevan a pensar que el espacio es ilimitado, lo cual explicaría en parte por qué los investigadores han prestado más atención a esta idea. Un espacio ilimitado ofrece una posibilidad particularmente extravagante para el futuro lejano del pensamiento, así que vamos a seguir la perspectiva inflacionaria predominante y suponer que el espacio es infinito[36].

La mayor parte del espacio infinito quedaría fuera del alcance de nuestra capacidad de observación. La luz emitida desde un lugar lejano solo es visible por nuestros telescopios si ha tenido el tiempo suficiente para atravesar el espacio que nos separa. Usando el tiempo de viaje máximo posible (la duración hasta el Big Bang, hace 13 800 millones de años), podemos calcular que la distancia máxima que podemos ver en cualquier dirección es de unos 45 000 millones de años luz (uno podría haber pensado que la respuesta es 13 800 millones de años luz, pero como el espacio se expande mientras la luz

se desplaza, la distancia máxima es mayor). Si otros seres hubieran nacido en un planeta más alejado de la Tierra que esa distancia, no nos habríamos podido comunicar de ningún modo, ni influirnos de manera mutua. Así que si suponemos que el espacio es infinito, podemos concebirlo como un mosaico de regiones de 90 000 millones de años luz ampliamente separadas, cada una de las cuales habría evolucionado con total independencia de las otras[37]. A los físicos les gusta pensar en cada una de estas zonas como si fuesen universos independientes, y entonces en conjunto constituirían un «multiverso». Así pues, una extensión infinita da origen a un multiverso compuesto por un número infinito de universos.

En sus indagaciones sobre estos universos, los físicos Jaume Garriga y Alex Vilenkin[38] establecieron una característica crucial. Si pudiéramos ver una serie de películas que mostrasen la evolución cosmológica de cada uno de ellos, no todas serían distintas. Como cada región tiene un tamaño infinito y contiene una cantidad grande pero finita de energía, solo habrá un número finito de tramas diferentes. Intuitivamente, uno podría pensar que no es así, que habría infinitas variaciones porque, dada una historia cualquiera, siempre se puede modificar alterando la posición de una partícula en uno u otro sentido. Pero el caso es que si las alteraciones de posición son demasiado pequeñas, caen por debajo del límite de sensibilidad de la incertidumbre cuántica, y por lo tanto no tienen la menor consecuencia, mientras que si son demasiado grandes, las partículas dejarían de estar en la misma región o sus energías superarían el máximo disponible. Restringidas de este modo por las escalas más pequeñas y por las más grandes, nos queda solo un número finito de variaciones, de modo que solo es posible una cantidad limitad de películas.

Con un número infinito de regiones y un número finito de películas, está claro que no hay historias suficientes para que todas sean distintas. Podemos estar seguros de que las tramas se repetirán; de hecho, podemos estar seguros de que lo harán un número infinito de veces. También es seguro que se verán todas las películas. Las agitaciones cuánticas que dan origen a una historia que es distinta de otras son aleatorias, y por lo tanto producen todas las configuraciones posibles. Ninguna historia queda atrás. La infinita colección de universos hace realidad todas las historias posibles, y cada una de ellas se representa infinitas veces.

Esto nos lleva a una peculiar conclusión: la realidad que experimenta el lector, o yo, o cualquier otra persona, ocurre también en otras regiones, en otros universos, una y otra vez. Si modificamos esa realidad de cualquier manera que no esté estrictamente prohibida por las leyes de la física (no

podemos, por ejemplo, violar la conservación de la energía o de la carga eléctrica), también esa historia estará ahí, repitiéndose una y otra vez. La mente se ve tentada a imaginar realidades alternativas: Lee Harvey Oswald falla el tiro, Claus von Stauffenberg triunfa, James Earl Ray fracasa[39]. Los aficionados a la física cuántica reconocerán una semejanza con la llamada «interpretación de muchos mundos», que imagina que todo posible resultado permitido por las leyes cuánticas se da en su propio universo. Los físicos llevan más de medio siglo debatiendo si esta interpretación de la mecánica cuántica tiene sentido matemáticamente y si, en caso afirmativo, los otros universos son reales o solo ficciones matemáticas útiles. La diferencia esencial es que en la teoría cosmológica que ahora exponemos los otros mundos (las otras regiones) no está sujeta a interpretación. Si el espacio es infinito, las otras regiones están ahí afuera.

A partir de todo lo que hemos visto en este capítulo y los anteriores, es razonable concluir que aquí, en esta región, en este universo, nuestros días y, en general, los de todos los seres pensantes, están contados. Su número puede ser muy alto, pero en algún momento de nuestro ascenso al Empire State Building, o quizá algo por encima, la vida y la mente probablemente encuentren su final. Contra este telón de fondo, Garriga y Vilenkin ofrecen una curiosa forma de optimismo. Señalan que como cada historia se representa en una colección infinita de universos, algunos necesariamente experimentarán caídas raras y fortuitas en la entropía que mantendrán intactas ciertas estrellas y planetas, y producirán nuevos entornos con las fuentes de energía de alta calidad o se dará alguno de los muchos procesos improbables que permiten que la vida y el pensamiento persistan mucho más tiempo de lo que cabría esperar. De hecho, Garriga y Vilenkin argumentan que si seleccionamos «cualquier» duración finita, por larga que sea, habrá universos dentro de esa infinita colección de universos en los cuales algunos procesos improbables nadarían contra la corriente entrópica y permitirían que la vida persistiera con al menos esa duración. En consecuencia, entre la infinidad de universos, algunos alojarían vida y mente durante un tiempo futuro arbitrariamente largo.

Es difícil saber cómo explicarían los habitantes de esas regiones la buena fortuna que les permite sobrevivir. O siquiera si serían conscientes de su buena fortuna. Quizá habrían alcanzando un conocimiento de la física parecido al que nosotros poseemos y reconocerían que las fluctuaciones aleatorias pueden tener resultados raros y fortuitos. Al mismo tiempo, ese conocimiento les haría saber que lo que experimentan, aunque posible, es

extraordinariamente improbable. Pero comprenderlo los llevaría a la conclusión de que necesitan revisar su conocimiento de la física. Pensémoslo. Aunque las leyes probabilísticas de la física cuántica permiten la posibilidad de que pueda atravesar un muro sólido, si lo hiciese, y lo hiciese de manera repetida, decidiríamos reformar a fondo nuestra comprensión de la física cuántica. Y no porque hubiera contravenido las leyes cuánticas, pues no lo habría hecho, sino solo porque si unos sucesos supuestamente improbables sucediesen, y lo hicieran a menudo, buscaríamos mejores explicaciones bajo las cuales esos sucesos dejasen de ser improbables. Por supuesto, también es posible que los habitantes de esas afortunadas regiones no se obsesionen en buscar explicaciones y solo se dejen llevar y vivan felices para siempre.

Como la probabilidad de que habitemos en una de esas regiones es prácticamente cero, igual que lo es la de que nos encontremos lo bastante cerca de una de ellas como para escaparnos hasta allí, quizá cuando atisbemos nuestro propio fin recojamos todo lo que hemos aprendido, descubierto y creado, lo metamos todo en una cápsula, y la enviemos al espacio con la esperanza de que algún día alcance alguna de las regiones más afortunadas. Si no formamos parte de un linaje que se extiende hasta la eternidad, tal vez podamos transmitir la esencia de nuestros logros a quienes sí forman parte de uno. Tal vez, aunque de forma indirecta, podamos dejar huella para la eternidad. Garriga y Vilenkin estudian una versión de este escenario, y con la ayuda de reflexiones del filósofo David Deutsch, llegan a la conclusión de que el plan es imposible. En la infinidad de universos y en la vastedad de los tiempos, las fluctuaciones cuánticas aleatorias producirán muchas más cápsulas falsas que las reales que puedan producir nuestros descendientes, por lo que cualquier huella fiable de quiénes somos y qué hemos logrado se perderá en medio del ruido cuántico.

Lo más probable es que la vida y el pensamiento en nuestro universo, en lo que siempre hemos considerado «el» universo, llegue un día a su fin. Quizá hallemos consuelo en saber que en algún lugar de las vastas extensiones del espacio infinito, mucho más allá de las fronteras de nuestro dominio, la vida y el pensamiento persista, quizá de manera indefinida. Aunque contemplemos la eternidad, aunque intentemos alcanzarla, no podremos tocarla.

11

LA NOBLEZA DE SER

Mente, materia y significados

El guía del parque nacional de Pilanesberg, con el rifle a la espalda, volvía a comprobar que quienes le acompañasen a pie supieran responder en el caso de que un elefante, un hipopótamo o un león se acercase más de lo conveniente. «Quedaos… quietos —nos conminó, recalcando cada palabra al tiempo que recorría con la mirada nuestro grupo—. ¿Escapar de un león corriendo? Se os irá la vida intentando ganar la carrera». Con una risa muda, todos murmuramos «sí», «claro», «sin duda». Justo entonces bajé la mirada hacia la manga de mi holgada camisa. Identificar con precisión lo que colgaba del puño era lo de menos. Para mí era una tarántula, y subía por la tela. Me espanté. Lancé los brazos a uno y otro lado, tiré vasos de la mesa del desayuno. Salté de la silla, y los platos que habían sobrevivido a mis primeros aspavientos cayeron entonces. En medio del caos, la tarántula, o lo que fuese aquella cosa horripilante, se despegó. Para cuando recobré la compostura, aquella criatura del tamaño de una pequeña moneda estaba en el suelo y se alejaba lentamente. «¡Ah! —soltó el guía, sonriendo, cuando todo se había calmado—, el universo le ha hablado a nuestro amigo físico. Irás en el *jeep* ». Desde luego que sí.

El universo no me había hablado. El ataque fue aleatorio y la coincidencia del momento, puro azar. De no haber sido parte implicada, habría formulado mi respuesta habitual, que ya he explicado antes, de que en ausencia del suceso nadie se habría sorprendido de que esa coincidencia no se hubiese producido. Pero lo cierto es que, por un breve instante, el bochornoso episodio cobró importancia. Ya no las tenía todas conmigo con eso de salir de safari a pie; me preguntaba si no debería echarme atrás, y justo entonces

recibí un recordatorio como a propósito de que ese riesgo particular no era lo más conveniente para quien, cuando está sumido en sus pensamientos, un simple saludo inesperado puede asustar de muerte. Racionalmente, sé que todo eso son tonterías. El universo no lleva la cuenta de lo que hago o de los peligros a los que me enfrento. Pese a ello, mientras los instintos atávicos inflamados por el ataque de la tarántula poco a poco se apagaban, el pensamiento racional aún estaba a un paso o dos de recobrar el control.

La sensibilidad a los patrones es una de las razones de nuestro éxito. Buscamos conexiones. Tomamos nota de las coincidencias. Señalamos regularidades. Atribuimos significados. Pero solo algunas de esas atribuciones son el resultado de análisis que intenten definir las características demostrables de la realidad. Muchas nacen de una preferencia emocional por imponer una apariencia de orden sobre el caos de la experiencia.

Orden y significado

A menudo hablo como si nuestras ecuaciones matemáticas estuviesen ahí afuera, en el mundo, controlando de manera implacable todos los procesos físicos, desde los quarks hasta el cosmos. Tal vez sea así. Tal vez algún día podamos establecer que la matemática está fundamentalmente cosida al tapiz de la realidad. Cuando uno trabaja con las ecuaciones día tras día, desde luego parece que sea así. En cualquier caso, me siento más seguro cuando afirmo que la naturaleza obedece las leyes, que el universo está compuesto por ingredientes cuyo comportamiento evoluciona de acuerdo con leyes. Esta es la impresión en la que se basa el viaje que hemos emprendido en este libro. Las ecuaciones del núcleo duro de la física moderna representan los enunciados más precisos que tenemos de esas leyes. Mediante laboriosos experimentos y observaciones hemos probado que esas ecuaciones explican el mundo con extraordinaria precisión. Pero nada nos garantiza que estén expresadas en el léxico intrínseco de la naturaleza. Aunque me parece improbable, pienso en la posibilidad de que en el futuro, cuando orgullosos enseñemos a unos extraterrestres nuestras ecuaciones, estos sonrían con cortesía y nos expliquen que también ellos empezaron con la matemática, pero luego descubrieron el «verdadero» lenguaje de la realidad.

Históricamente, la intuición física de nuestros antepasados se basaba en las pautas evidentes en los sucesos que observaban de manera habitual, desde la caída de rocas a la rotura de ramas o la corriente de los ríos. Un sentido innato de la mecánica de lo cotidiano posee un valor manifiesto para la supervivencia. Con el tiempo, fuimos utilizando nuestras capacidades cognitivas para ir más allá de las intuiciones que mejoran la supervivencia, iluminando y codificando patrones en ámbitos que van del micromundo de las partículas individuales al macromundo de los grupos de galaxias, aunque muchos de esos patrones tengan poco o ningún valor adaptativo. Al modelar nuestra intuición y desarrollar nuestras habilidades cognitivas, la evolución inició nuestra educación en física, pero nuestro conocimiento más general ha surgido de la fuerza de la curiosidad humana expresada a través del lenguaje de las matemáticas. Las ecuaciones resultantes, articuladas en este lenguaje, son de enorme utilidad para explorar la estructura profunda de la realidad, pero aun así podrían no ser más que constructos de la mente humana.

Me aferro también a cierta versión de esta perspectiva cuando dirigimos la atención a las cualidades que guían nuestra evaluación de la experiencia humana. Correcto e incorrecto, bueno y malo, destino y propósito, valor y significado son todos conceptos profundamente útiles, pero no me cuento entre quienes creen que los juicios morales y las atribuciones de significado trascienden la mente humana. Somos nosotros quienes inventamos esas cualidades, pero no de la nada. Nuestras mentes, producto de una selección darwiniana, están predispuestas a sentir atracción, repugnancia o miedo ante diversas ideas y comportamientos. En todo el mundo se valora enormemente el cuidado de niños y jóvenes mientras que se aborrece el incesto. También se aprecia la honradez en los intercambios cotidianos y la lealtad a la familia y los compatriotas. A medida que nuestros antepasados se fueron reuniendo en grupos, la interacción de estas y otras predisposiciones con los encuentros y conflictos sobre el terreno crearon bucles de realimentación: el comportamiento de los individuos influía en la efectividad de la vida en grupo, y eso condujo a la paulatina articulación de códigos de conducta comunitarios; a su vez, esas normas aportaban cierto valor para la supervivencia a quienes las seguían[1]. Del mismo modo que la selección natural modeló nuestra intuición hacia la física básica, también contribuyó a modelar nuestro sentido innato de la moralidad y el valor.

Incluso entre quienes coinciden en creer que los códigos morales no están impuestos desde lo alto ni flotan en el dominio abstracto de la verdad se desarrolla un sano debate acerca del papel de la cognición humana a la hora

de determinar cómo se desarrollaron aquellas antiguas sensibilidades. Algunos sugieren que, de manera parecida al patrón de desarrollo para la física, la evolución imprimió un sentido moral rudimentario, pero luego nuestras capacidades cognitivas nos permitieron saltar por encima de ese cimiento innato y modelar actitudes y creencias independientes[2]. Otros sugieren que poseemos la habilidad de usar nuestra destreza cognitiva para elaborar explicaciones de nuestros compromisos morales, pero que estas no son más que justificaciones *ad hoc*, racionalizaciones de juicios que están anclados en nuestro pasado cognitivo[3].

Una cuestión que merece la pena volver a enfatizar es que ninguna de estas posiciones depende de un concepto tradicional del libre albedrío. A la hora de describir el comportamiento humano recurrimos a una amalgama de factores, desde el instinto y la memoria hasta la percepción y las expectativas sociales. Sin embargo, tal como hemos argumentado, este tipo de explicación de alto nivel (pues yace en el núcleo de cómo los humanos damos sentido al mundo) surge de una compleja cadena de procesos que en último término descansan en la dinámica de los constituyentes fundamentales de la naturaleza. Todos somos colecciones de partículas, beneficiarios de innumerables batallas evolutivas que han liberado nuestros comportamientos y nos han brindado la capacidad de demorar la decadencia entrópica. Pero esos triunfos no nos conceden ningún libre albedrío sobre la progresión de lo físico, sobre un despliegue que no aguarda a nuestros deseos, juicios y valoraciones morales. O, por decirlo de manera más precisa, nuestros deseos, juicios y valoraciones morales son simplemente parte de la progresión física del mundo de acuerdo con los dictados de las imparciales leyes de la naturaleza.

Nuestra descripción de esa progresión apela a impersonales reglas matemáticas que muestran con símbolos cómo se desarrollará el universo de un momento al siguiente. Y durante buena parte del pasado, antes de que aparecieran colecciones de partículas capaces de reflexionar sobre la realidad, esa era toda la historia. Ahora que ya estamos familiarizados con los detalles, podemos dar nuestra versión más refinada, aunque provisional, de esa historia a través de un relato rápido, breve y, por la facilidad del lenguaje, con algunos tintes antropomórficos.

Hace unos 13 800 millones de años, dentro de un espacio en pleno furor inflacionario, la energía contenida en una nube minúscula pero ordenada de campo de inflatón se desintegró, se apagó la gravedad repulsiva, y se llenó el espacio de un baño de partículas, sembrándose de este modo la síntesis de los

núcleos atómicos más simples. Allí donde la incertidumbre cuántica ocasionaba una densidad ligeramente mayor en aquel baño de partículas, el tirón de la gravedad, un poco más fuerte, persuadía a las partículas para que se reunieran en agregados cada vez mayores, formando estrellas, planetas, satélites y otros cuerpos celestes. La fusión dentro de las estrellas, así como infrecuentes pero poderosas colisiones estelares, juntaron aquellos núcleos simples en especies atómicas más complejas, las cuales, al caer en (al menos) un planeta en formación, fueron coaccionadas por el darwinismo molecular a ensamblarse en estructuras ordenadas capaces de replicarse a sí mismas. Las variaciones aleatorias de estas estructuras que resultaron ser más fecundas se esparcieron ampliamente. Entre estas se encontraban vías moleculares para extraer, almacenar y dispersar información y energía, que son los procesos rudimentarios de la vida, que a través del largo viaje de la evolución darwiniana se fueron perfeccionando. Con el tiempo, surgieron seres vivos complejos y autónomos.

Partículas y campos. Leyes físicas y condiciones iniciales. Hasta las honduras de la realidad que hemos explorado hasta el momento, no hay indicios de que exista nada más. Partículas y campos son los ingredientes elementales. Las leyes físicas inducidas por las condiciones iniciales dictan la progresión. Como la realidad es mecánico-cuántica, los mandatos de las leyes son probabilísticos, pero las probabilidades siguen estando rígidamente determinadas por las matemáticas. Partículas y campos hacen lo que hacen sin importarles el significado, el valor, la relevancia. Incluso cuando su indiferente progresión matemática produce la vida, las leyes físicas retienen el control total. La vida carece de la capacidad de interceder o rechazar o influir en las leyes.

Lo que la vida sí puede hacer es facilitar que grupos de partículas actúen de manera concertada y manifiesten comportamientos colectivos que, en comparación con el mundo inanimado, son novedosos. Las partículas que constituyen las caléndulas y las canicas siguen al pie de la letra las leyes de la naturaleza, pero las caléndulas crecen buscando el sol y las canicas no. Por medio de la fuerza de la selección, la evolución contribuye a modelar el repertorio de comportamientos de la vida, favoreciendo las actividades que mejoran la supervivencia y la reproducción. Entre estas, finalmente, se encuentra la capacidad de pensar. La capacidad de formar recuerdos, de analizar situaciones, de extrapolar a partir de la experiencia proporciona una poderosa artillería en la carrera armamentística por la supervivencia. Mientras promueve una larga serie de victorias durante decenas de miles de

generaciones, el pensamiento poco a poco se perfecciona en especies pensantes que adquieren diversos grados de conciencia de sí mismas. Las voluntades de esos seres no son libres en el sentido tradicional de eludir el despliegue dictado por la ley física, pero su estructura altamente organizada permite un amplísimo abanico de respuestas, desde las emociones íntimas a los comportamientos externos, que, al menos hasta el momento, no poseen las colecciones de partículas que carecen de vida o mente.

Añadimos el lenguaje, y una de esas especies conscientes de sí mismas se alza por encima de las necesidades del momento y se contempla como parte de un despliegue del pasado al futuro. Ahora ganar la batalla ya no es lo único que importa. Ya no nos satisface el solo hecho de sobrevivir. Queremos saber por qué importa la supervivencia. Buscamos contexto. Indagamos la relevancia. Atribuimos valor. Juzgamos comportamiento. Perseguimos significado.

De este modo, desarrollamos explicaciones sobre cómo se originó el universo, sobre cómo podría acabar. Contamos una y otra vez historias de mentes que se abren camino por mundos reales o ficticios. Imaginamos otras esferas pobladas por antepasados muertos o seres poderosos o todopoderosos que reducen la muerte a un paso más de una existencia perdurable. Pintamos y tallamos y grabamos y cantamos y bailamos para tocar esas otras esferas, o para rendirles homenaje, o simplemente para imprimir en el futuro algún testimonio de nuestra breve estancia bajo el sol. Quizá estas pasiones arraigan y pasan a formar parte de lo que significa ser humano porque mejoran la supervivencia. Las historias preparan la mente para responder ante lo inesperado; el arte desarrolla la imaginación y la innovación; la música afina la sensibilidad a los patrones; la religión une a los adeptos en fuertes coaliciones. O quizá la explicación sea más mundana: algunas o todas las actividades podrían haber surgido y persistido porque aprovechan o van de la mano de otros comportamientos y respuestas que han desempeñado un papel más directo en la mejora de la supervivencia. Pero aunque su origen evolutivo siga siendo objeto de debate, estos aspectos del comportamiento humano ponen de manifiesto una generalizada necesidad de no quedarse en una mera supervivencia transitoria. Revelan un anhelo común por ser parte de algo más grande, algo más duradero. Valor y significado, decididamente ausentes de los cimientos de la realidad, se tornan intrínsecos de una inquietud que nos eleva sobre una naturaleza indiferente.

Mortalidad y significado

Gottfried Leibniz se preguntaba por qué hay algo en lugar de no haber nada, pero el dilema personal profundo es que los entes conscientes de sí mismos, como nosotros, acabamos disolviéndonos en la nada. Adquirir una perspectiva temporal implica percatarse de que la vivaz actividad que anima nuestra propia mente un día cesará.

Contra el telón de fondo de esa consciencia, los capítulos previos han explorado el despliegue completo de los tiempos, desde nuestro mejor conocimiento de sus orígenes hasta lo más cerca que nuestras teorías matemáticas pueden acercarnos a su final. ¿Seguiremos desarrollando nuestro conocimiento? Desde luego. ¿Mejoraremos o reemplazaremos detalles, algunos menores, otros más significativos? Sin duda. Pero persistirá el ritmo de nacimientos y muertes, emergencia y desintegración, creación y destrucción que hemos visto desplegarse a lo largo de los tiempos. El paso a dos de la entropía y las fuerzas evolutivas de la selección enriquecerán el camino del orden al desorden con prodigiosas estructuras, pero estas, no importa si son estrellas o agujeros negros, planetas o personas, moléculas o átomos, acabarán desapareciendo. Su longevidad varía enormemente, pero el hecho de que todos moriremos, el hecho de que la especie humana perecerá, el hecho de que la vida y la mente, al menos en este universo, casi con toda certeza se extinguirán, son resultados a largo plazo que, bajo la ley física, son comunes y esperados. La única novedad es que nos damos cuenta de ello.

Una esperanza frecuente pero escabrosa, contemplada con levedad por muchos y perseguida con intensidad por pocos, es que estaríamos mucho mejor si la muerte se apartase cortésmente de los asuntos humanos. Desde los antiguos mitos hasta la moderna ficción, los pensadores han cavilado sobre esta posibilidad. Quizá sea revelador que en estas indagaciones las cosas no suelan salir del todo bien. Los inmortales de la tierra de Luggnagg de Jonathan Swift siguen envejeciendo y son declarados muertos a los ochenta años, tras caer en la irrelevancia. Después de vivir más de trescientos años, la heroína Elina Makropulos de Karel Čapek prefiere que la fórmula del elixir de la vida arda en llamas antes que seguir viviendo en un estado de profundo hastío. Habitante de un mundo infinito donde no existe la muerte, el protagonista de «El inmortal», de Jorge Luis Borges, escribe:

> Nadie es alguien, un solo hombre inmortal es todos los hombres […] soy dios, soy héroe, soy filósofo, soy demonio y soy mundo, lo cual es una fatigosa manera de decir que no soy[4].

También los filósofos han surcado estas aguas y nos han ofrecido valoraciones sistemáticas de la vida en un mundo sin muerte. Algunos, como Bernard Williams, inspirado por la adaptación a la ópera que hizo Leǒs Janácěk de la obra de Čapek, llegan a conclusiones igualmente sombrías[5]. Williams argumenta que en un tiempo eterno cada uno de nosotros saciaría todas las metas que nos empujan a seguir, y quedaríamos apáticos ante una monótona y tediosa eternidad. Otros, como Aaron Smuts, inspirados en parte por el cuento de Borges, contienden que la inmortalidad despojaría las decisiones que dan forma a una vida humana (en qué pasar el tiempo y con quién) de las consecuencias esenciales que les confieren significado. ¿Tomamos la decisión incorrecta? No hay problema. Tenemos toda la eternidad para corregirla. La satisfacción de los logros también caería víctima de la inmortalidad. Los dotados de habilidades limitadas alcanzarían su potencial para luego experimentar una eterna frustración, y aquellos con habilidades capaces de profundizar sin límite sabrían que mejorarían continuamente, lo cual restaría valor a la sensación de logro que acompaña a la superación de las expectativas[6].

Pese a estas preocupaciones, sospecho que somos lo bastante ingeniosos (y dotados de tiempo sin fin lo seríamos aún más) como para llegar a realizarnos como inmortales. Nuestras necesidades y capacidades posiblemente se transformarían hasta hacerse irreconocibles, con lo cual toda valoración de lo que nos mantiene animados y motivados en el aquí y ahora tendría poca o nula relevancia. Si una *joie de vivre* eterna requiere de otras alegrías, las encontraríamos, las inventaríamos o las desarrollaríamos. Es solo una intuición, por supuesto, pero decidir que acabaríamos aburriéndonos me parece una visión indebidamente provinciana de la mente inmortal.

Aunque la ciencia seguirá alargando nuestras vidas, nuestro viaje por el futuro lejano sugiere que la inmortalidad siempre quedará fuera de nuestro alcance. Pese a ello, pensar en la vida que nunca acaba clarifica la relevancia de la que sí lo hace. El destino imaginado del valor y significado de un mundo inmortal deja claro que, en uno mortal, comprender muchas de nuestras decisiones, elecciones, experiencias y reacciones nos obliga a verlas en el contexto de oportunidades limitadas y duraciones finitas. No es que hayamos de ponernos en pie cada día al grito de *¡Carpe diem!*, pero el conocimiento

profundo de que hay un número limitado de mañanas en que nos levantaremos infunde en nosotros un cálculo de valor intuitivo que sería muy distinto en un mundo con oportunidades ilimitadas. Las explicaciones que damos de los sujetos que estudiamos, los oficios que aprendemos, las obras que perseguimos, los riesgos que tomamos, las parejas a las que nos unimos, las familias que fundamos, las metas que nos marcamos, todo ello refleja el reconocimiento de que nuestras oportunidades son escasas porque nuestro tiempo es limitado.

Todos respondemos a ese reconocimiento a nuestra manera, pero hay cualidades comunes que impregnan el sentido humano del valor. Entre ellas está el anhelo asombrosamente fuerte y a menudo callado de un futuro poblado por descendientes que vivan cuando nosotros ya no estemos.

Descendencia

Hace muchos años me pidieron que participara en una mesa redonda con el público tras la representación de una obra de teatro (no de Broadway) en la que una serie de personajes se percatan de que la Tierra está a punto de ser destruida por un asteroide. Quien me acompañaba en la mesa era mi propio hermano; a los productores debió parecerles que los comentarios sobre el fin del mundo de dos hermanos cuyas vidas habían seguido caminos divergentes pero relevantes (uno inmerso en la ciencia, el otro en la religión) agradaría al público. Con franqueza, no pensé mucho sobre las cuestiones por tratar antes del evento, y por aquel entonces era mucho más susceptible a la energía de una audiencia. Cuanto más divagaba mi hermano hacia el ámbito de lo etéreo, más brusco me tornaba yo. «La Tierra no es más que un planeta corriente en órbita alrededor de una estrella corriente en los arrabales de una galaxia corriente. Si un asteroide nos aniquila, el universo ni siquiera parpadeará. En el gran esquema de las cosas, sencillamente no importamos». La crudeza fue bien acogida por algunos, imagino que por quienes se consideraban escépticos sensatos con el coraje suficiente para afrontar las realidades de la existencia. A otros, lamentablemente, mis comentarios les parecieron petulantes. O por lo menos a una persona de la audiencia, una mujer mayor que me reprendió por pisotear lo que ella describió como una necesidad esencial que todos tenemos

de que la especie perviva. «¿Qué noticia le afectaría más? —me espetó—. ¿Saber que le queda un año de vida o que en un año la Tierra será destruida?»

En aquel momento respondí alguna cosa superficial al estilo de que eso dependería de si alguna de las dos posibilidades implicaba dolor físico, pero más tarde, meditando sobre la cuestión, me pareció inesperadamente esclarecedora. Un pronóstico terminal afecta a la gente de distintas maneras: ayuda a centrarse, proporciona perspectiva, alimenta el arrepentimiento, incita al pánico, brinda aplomo o inspira una súbita comprensión. Me pareció que mi propia reacción estaría entre esas. En cambio, la perspectiva de que la Tierra y toda la humanidad fuesen aniquiladas suscitaba en mí una reacción de otro tipo. La noticia haría que todo me pareciera inútil. Mientras que mi propia muerte acrecentaría la intensidad, dotando de significado momentos que de otro modo se habrían replegado en el devenir cotidiano, contemplar el fin de toda la especie me parecía que produciría lo contrario, una sensación de inanidad. ¿Todavía me levantaría cada mañana con ganas de seguir mis investigaciones de física? Quizá por hacer algo familiar me resultaría reconfortante, pero sin nadie que siga construyendo a partir de los descubrimientos presentes, el deseo de incrementar el conocimiento se debilitaría. ¿Acabaría el libro que estaba escribiendo? Quizá por la satisfacción de no dejar cabos sueltos, pero sin nadie que pueda leer la obra acabada, perdería la motivación. ¿Seguiría enviando a mis hijos al colegio? Quizá por la calma que ofrece la rutina, pero sin futuro, ¿para qué se estarían preparando?

El contraste en mi manera de reaccionar ante la noticia de mi propia muerte me sorprendió. Mientras que una de las alternativas parecía intensificar la conciencia del valor de la vida, la otra parecía apagarla. Desde entonces no pienso sobre el futuro de la misma manera. En aquel momento ya habían pasado muchos años desde mi epifanía de juventud acerca de la capacidad de la matemática y la física para trascender el tiempo, ya estaba convencido de la significación existencial del futuro. Pero mi imagen del futuro era abstracta. Era un territorio de ecuaciones, teoremas y leyes, no un lugar poblado de rocas, árboles y personas. No soy ningún platónico; no obstante, de manera implícita me parecía que la matemática y la física no trascendían solamente el tiempo, sino también las usuales manifestaciones externas de la realidad material. El escenario apocalíptico refinó mis razonamientos al hacer dolorosamente evidente que nuestras ecuaciones, teoremas y leyes, por mucho que beban de las verdades fundamentales, no poseen ningún valor intrínseco. No son, al final, más que una colección de

líneas y garabatos trazados en pizarras o impresos en revistas y libros de texto. Su valor proviene de quienes las entienden y valoran; su mérito, de las mentes en las que habitan.

Este refinamiento en mi modo de pensar fue mucho más allá del papel de las ecuaciones. Al llevarme a imaginar un mundo sin nada o nadie que pueda recibir todo aquello que valoramos, sin nadie que pueda añadir su propia icónica huella y transmitirlo a generaciones futuras, el escenario apocalíptico revelaba hasta qué punto percibiríamos ese futuro como inane. Mientras que la inmortalidad del individuo desgasta el significado, la de la especie se antoja necesaria para preservarlo.

No puedo saber cuán general sería esta reacción ante la noticia de un fin inminente, pero sospecho que sería común. El filósofo Samuel Scheffler se embarcó recientemente en una indagación académica sobre esta cuestión, explorando una variante de la pregunta planteada hace décadas. ¿Cómo responderíamos —nos pregunta Scheffler—, si nos dijesen que treinta días después de nuestra propia muerte se extinguirían el resto de los mortales? Es una versión más reveladora del escenario porque separa nuestra propia muerte prematura y, de este modo, sitúa un foco más estrecho sobre el papel de los descendientes como sostén del valor. La conclusión de Scheffler, cuidadosamente razonada, se hace eco de mis propias reflexiones:

> Nuestras preocupaciones y compromisos, nuestros valores y juicios de valor, nuestro sentido de qué importa y qué merece hacerse, todo eso se forma y sustenta contra un telón de fondo en el que damos por hecho que la vida humana pervive y prospera […] Necesitamos que la humanidad tenga futuro para que la propia idea de que las cosas «importan» mantenga un lugar seguro en nuestro propio repertorio conceptual[7].

Otros filósofos han intervenido con opiniones que definen un abanico más amplio de perspectivas. Susan Wolf sugiere que reconocer nuestro destino compartido puede elevar la estimación hacia los otros hasta nuevas alturas, pero concuerda en que nuestra visión de un futuro poblado por humanos es esencial para el valor que asignamos a las empresas que acometemos[8]. Harry Frankfurt ofrece una visión diferente: sugiere que muchas de las cosas que apreciamos no se verían afectadas por el escenario apocalíptico, en particular el arte y la investigación científica. A su entender, la gratificación intrínseca de estas actividades bastaría para que muchos siguieran dedicándose a ellas.

Ya he ofrecido mi desacuerdo en cuanto a la investigación científica, lo cual me lleva a enfatizar una cuestión relacionada, no por obvia menos reveladora: la gente respondería a la noticia de formas muy diversas[9]. Lo más que podemos hacer es intentar imaginar las tendencias predominantes. Para mí, y para muchos otros, entregarse a proyectos artísticos o académicos es formar parte de un prolongado, fértil y continuado diálogo humano. Aunque un artículo científico que pueda escribir no vaya a revolucionar el mundo, hará que me sienta partícipe de una conversación. Si descubro que soy el último en hablar, si sé que no habrá nadie más en el futuro que piense sobre lo que yo digo, me quedo con la duda de por qué habría de molestarme en decirlo.

En el escenario de Scheffler, al igual que en la pregunta que me plantearon hace algunos años, los apocalipsis eran hipotéticos, pero las escalas de tiempo para la destrucción del mundo eran fáciles de asimilar. En este libro, los finales del mundo que exploramos son genuinos, pero sus escalas de tiempo los convierten en extraordinariamente remotos. ¿Afecta este colosal cambio de escala las conclusiones? Es una cuestión que tanto Scheffler como Wolf consideran dentro del ameno contexto de la deliciosa escena de *Annie Hall* en la que el niño de nueve años Alvy Singer llega a la conclusión de que no tiene sentido hacer los deberes si en unos pocos miles de millones de años la expansión del universo acabará destruyéndolo todo. Al psicólogo de Alvy, y aún más a su madre, la preocupación del pequeño les parece ridícula. Las audiencias ríen el chiste porque también les parece absurda la inquietud de Alvy. Scheffler comparte estas intuiciones, pero se da cuenta de que él mismo no conoce una justificación fundamental de por qué nos parece razonable sufrir una crisis existencial frente a una destrucción inminente, pero no cuando esa destrucción ocurre en el futuro lejano. Lo atribuye a la dificultad de asimilar escalas de tiempo que rebasan en mucho las propias de la experiencia humana. Wolf coincide con esta apreciación: si la extinción inmediata de la humanidad haría que la vida careciera de sentido, lo mismo debería ser cierto aunque ese fin sea muy lejano. De hecho, como bien observa, a escalas de tiempo cósmicas una demora de unos pocos miles de millones de años no es nada.

Estoy de acuerdo. Enfáticamente.

Como hemos visto una y otra vez, la idea de que una duración sea larga o corta carece de significado. Largo o corto es cuestión de perspectiva. El tiempo representado por la terraza de observación del Empire State Building, en la planta 86, es enorme bajo los estándares de la experiencia cotidiana, pero si la comparamos con el tiempo representado por la planta 100, es como

comparar un parpadeo con diez mil siglos. La perspectiva humana nos lleva a emitir juicios que, aunque relevantes, son de miras estrechas. Por esa razón, veo la posibilidad de una aniquilación inmediata solamente como una herramienta que aprovecha una urgencia artificial para catalizar una respuesta auténtica. Nuestra intuición sigue siendo válida para el fin que aguarda a nuestros descendientes del futuro lejano; al fin y al cabo, ese futuro, visto desde un contexto mayor, «es» de aquí a un momento.

Aunque sin duda es difícil internalizar escalas de tiempo que rebasan ampliamente todo lo que experimentamos, el viaje que hemos emprendido en este libro ha salpicado la cronología cósmica con hitos que ayudan a hacer concreto lo abstracto. No puedo decir que posea un sentido innato de las escalas de tiempo que marca nuestra metáfora del Empire State Building del mismo modo que tengo un sentido de las escalas de tiempo de la vida cotidiana, de mi generación, o incluso de unas pocas generaciones, pero la secuencia de sucesos transformadores que hemos explorado proporciona asideros por los que agarrar ese futuro. No hacen falta cantos, y la posición del loto es opcional; basta con buscar un lugar tranquilo y dejar que la mente flote lenta y libremente por el tiempo cósmico, que se desplace por toda nuestra época y más allá, hacia la era de las lejanas galaxias en recesión, pasada la era de los majestuosos sistemas solares, pasada la era de las gráciles galaxias espirales, más allá de la era de las estrellas agotadas y los planetas vagabundos, más allá incluso de la era de los agujeros negros que relumbran y se desintegran. Y aún más hacia la extensión fría, oscura, casi vacía y potencialmente ilimitada donde los indicios de que alguna vez existimos se reducen a alguna partícula aislada que se encuentra aquí y no allá, u otra partícula aislada que se mueve en este sentido y no en aquel otro. Y para quien sea un poco como yo mismo y permita que esa realidad se asiente por completo, el hecho de que hayamos viajado hasta un futuro increíblemente remoto no disminuye apenas el temblor, ni tampoco la fascinación, que crece en nuestro interior. En un sentido fundamental, la enorme vastedad de la escala de tiempo tan solo añade peso a la insoportable levedad del ser; en comparación con los tiempos remotos que hemos alcanzado, la época de la vida y la mente es infinitesimal. A las escalas que ahora consideramos, el tiempo transcurrido desde los primeros microbios al último pensamiento sería menor incluso que el que requiere la luz para atravesar el núcleo de un átomo. La duración entera de la actividad humana, tanto si nos aniquilamos nosotros mismos en el próximo siglo como si nos aniquila un desastre natural en los próximos milenios, o si de algún modo hallamos la manera de persistir hasta

la muerte del Sol, el fin de la Vía Láctea o incluso el fin de la materia compleja, sería más fugaz todavía.

Somos efímeros. Somos evanescentes.

Pero nuestro momento es insólito y extraordinario, y reconocerlo nos permite hacer de la impermanencia de la vida y de la escasez de la conciencia autorreflexiva el cimiento de la significación y el fundamento de la gratitud. Aunque anhelemos un legado perdurable, la claridad que conseguimos al explorar la línea del tiempo cósmica nos desvela que eso queda fuera de nuestro alcance. Pero esa misma clarividencia subraya el absoluto portento de que una pequeña colección de las partículas del universo pueda alzarse, examinarse a sí misma y a la realidad que habita, determinar su naturaleza transitoria y, en un fugaz estallido de actividad, crear belleza, desvelar conexiones e iluminar el misterio.

Significado

La mayoría de nosotros nos ocupamos calladamente de la necesidad de elevarnos por encima de lo cotidiano. La mayoría de nosotros permitimos que la civilización nos proteja de darnos cuenta de que formamos parte de un mundo que, cuando hayamos desaparecido, seguirá su curso sin apenas inmutarse. Enfocamos nuestra energía en aquello que podemos controlar. Hacemos comunidad. Participamos. Nos preocupamos. Reímos. Estimamos. Nos afligimos. Amamos. Celebramos. Consagramos. Nos lamentamos. Nos emocionamos con los logros, a veces los nuestros, otras veces los de quienes respetamos o idolatramos.

Con todo ello, nos vamos acostumbrando a buscar en el mundo algo que nos emocione o nos sosiegue, que capte nuestra atención o nos transporte a otro lugar. Pero el viaje científico que hemos realizado sugiere con fuerza que el universo no existe para crear el entorno en el que florezcan la vida y la mente. Vida y mente no son más que un par de cosas que resulta que ocurren. Hasta que dejan de hacerlo. Solía imaginar que estudiando el universo, pelándolo capa a capa figurativa y literalmente, daríamos respuesta a un número de cómos suficientes para atisbar las respuestas a los porqués. Sin embargo, cuanto más sabemos, más parece que esa no es la actitud adecuada.

Esperar que el universo nos abrace a nosotros, unos transitorios okupas conscientes, es comprensible, pero no es lo que el universo hace.

Aun así, ver nuestro momento dentro de contexto es comprender que nuestra existencia es asombrosa. Si ejecutáramos de nuevo el Big Bang pero cambiásemos ligeramente la posición de esta partícula o el valor de aquel campo, o casi cualquier otro cambio, el nuevo despliegue del cosmos no nos incluiría a ninguno de nosotros, ni a la especie humana, ni al planeta Tierra, ni a nada de lo que tanto apreciamos. Si una superinteligencia mirase el universo como un todo, igual que nosotros miramos una tirada de monedas como un todo o el aire que ahora respiramos como un todo, llegaría a la conclusión de que el nuevo universo se parece mucho al original. Para nosotros, sin embargo, sería radicalmente distinto. No habría un «nosotros» para percatarse de ello. Al desviar nuestra atención de los detalles finos, la entropía proporciona un principio organizativo universal para comprender las tendencias a gran escala en la transformación de las cosas. Pero así como no solemos preocuparnos de si una moneda particular sale cara o cruz, o de si una molécula de oxígeno concreta resulta estar aquí o allí, hay ciertos detalles finos que nos conciernen mucho. Profundamente. Existimos porque nuestra particular ordenación de partículas le ganó la batalla a un fenomenal surtido de otras ordenaciones, todas compitiendo por realizarse. Por la gracia de un azar canalizado a través de las leyes de la naturaleza, somos nosotros quienes estamos aquí.

Esto, una vez comprendido, encuentra eco en cada estadio del desarrollo humano y cósmico. Pensemos en lo que Richard Dawkins describió como la colección casi infinita de personas potenciales, de posibles portadores de la casi infinita colección de secuencias de pares de bases del ADN, que nunca llegarán a nacer. O pensemos en los momentos que conforman la historia del cosmos, desde el Big Bang hasta nuestro propio nacimiento y hasta el día de hoy, llenos de procesos cuánticos cuya implacable progresión probabilística en una serie casi ilimitada de encrucijadas podrían haber conducido a tal o cual resultado en lugar de este, dando lugar así a un universo igual de sensato, pero que no nos incluiría a ninguno de nosotros[10]. Y, sin embargo, pese a este número astronómico de posibilidades y contra toda probabilidad, la que hoy existe es nuestra secuencia de pares de bases, nuestra peculiar combinación molecular. ¡Qué espectacularmente improbable! ¡Qué apasionadamente prodigioso!

Y el regalo es aún mayor: nuestras particulares combinaciones moleculares, nuestras ordenaciones químicas y biológicas y neurológicas

específicas, nos brindan los envidiables poderes que han ocupado nuestra atención en anteriores capítulos. Mientras toda la vida, en sí misma igualmente milagrosa, está atada a lo inmediato, nosotros podemos escapar al tiempo. Podemos pensar en el pasado, imaginar el futuro. Podemos asimilar el universo, procesarlo, explorarlo con cuerpo y mente, con razón y emoción. Desde nuestro solitario rincón del cosmos hemos usado la creatividad y la imaginación para dar forma a palabras, imágenes, estructuras y sonidos que expresen nuestros anhelos y frustraciones, nuestras confusiones y revelaciones, nuestros fracasos y triunfos. Hemos usado el ingenio y la perseverancia para alcanzar los límites mismos del espacio interior y exterior, para determinar leyes fundamentales que gobiernan cómo brillan las estrellas y cómo viaja la luz, cómo pasa el tiempo y se expande el espacio; unas leyes que nos permiten atisbar el universo un brevísimo momento después de su origen, para luego dirigir la mirada hacia el futuro y contemplar su final.

Todo este fabuloso conocimiento viene acompañado de preguntas profundas y persistentes. ¿Por qué hay algo en lugar de nada? ¿Qué desencadenó el origen de la vida? ¿Cómo surgió la conciencia? Hemos explorado un amplio abanico de conjeturas, pero las respuestas definitivas todavía nos eluden. Quizá nuestros cerebros, bien adaptados para sobrevivir en el planeta Tierra, sencillamente carezcan de la estructura necesaria para resolver esos misterios. O quizá, a medida que nuestra inteligencia siga evolucionando, nuestra relación con la realidad adquiera un carácter distinto por completo, con el resultado de que las preguntas que hoy nos parecen más imponentes se tornen irrelevantes. Puede ser. Pero el hecho de que el mundo tal como lo entendemos en la actualidad, con los misterios que quedan por resolver, persista con tan rigurosa coherencia matemática y lógica, y el hecho de que hayamos logrado descifrar tanto de esa coherencia, me sugiere que ninguna de esas dos posibilidades es correcta. No nos falta capacidad mental. No estamos mirando la pared de Platón, inconscientes de una forma de verdad radicalmente distinta, apenas fuera de nuestro alcance, con el poder de proporcionarnos de repente una sorprendente nueva claridad.

Nos precipitamos hacia un cosmos frío y yermo, pero debemos aceptar que no hay ningún gran diseño. Las partículas no están dotadas de propósito. No hay ninguna respuesta final que aguarde en las profundidades del espacio a que la descubramos. Solo hay que ciertas colecciones especiales de partículas pueden pensar, sentir y reflexionar y pueden, dentro de esos mundos subjetivos, impartir sentido. Y así, en nuestro empeño por explorar el fondo de la condición humana, la única dirección a la que cabe dirigir la

mirada es hacia el interior. Ese es el sentido noble al que mirar. Una dirección que renuncia a respuestas hechas a medida para volcarse en el personalísimo viaje de construir su propio significado. Una dirección que nos lleva al corazón de la propia expresión creativa y a la fuente misma de nuestros relatos de mayor resonancia. La ciencia es una herramienta poderosa y exquisita para aprehender la realidad externa. Pero dentro de ese marco, dentro de ese conocimiento, todo lo demás es la especie humana contemplándose a sí misma, aprendiendo lo que necesita para seguir adelante y contando una historia que resuena en la oscuridad, una historia esculpida en sonido y tallada en silencio, una historia que, en su más alta expresión, conmueve al alma.

Agradecimientos

Me siento agradecido a las muchas personas que me hicieron llegar sus valiosos comentarios mientras escribía este libro. Por su atenta lectura del manuscrito, en algunos casos más de una vez, y por ofrecer perspectivas, críticas y sugerencias que mejoraron sustancialmente la exposición, me siento en deuda con Raphael Gunner, Ken Vineberg, Tracy Day, Michael Douglas, Saakshi Dulani, Richard Easther, Joshua Greene, Wendy Greene, Raphael Kasper, Eric Lupfer, Markus Pössel, Bob Shaye y Doron Weber. Por su detenida lectura de secciones o capítulos concretos, por sus comentarios o por atender a mis preguntas, vaya mi agradecimiento a David Albert, Andreas Albrecht, Barry Barish, Michael Bassett, Jesse Bering, Brian Boyd, Pascal Boyer, Vicki Carstens, David Chalmers, Judith Cox, Dean Eliott, Jeremy England, Stuart Firestein, Michael Graziano, Sandra Kaufmann, Will Kinney, Andréi Linde, Avi Loeb, Samir Mathur, Peter de Menocal, Brian Metzger, Ali Mousami, Phil Nelson, Maulik Parikh, Steven Pinker, Adam Riess, Benjamin Smith, Sheldon Solomon, Paul Steinhardt, Giulio Tononi, John Valley y Alex Vilenkin. Doy las gracias también al equipo completo de Knopf, en particular a la revisora del texto, Amy Ryan; al editor adjunto, Andrew Weber; al diseñador, Chip Kidd; a la editora de producción, Rita Madrigal; y a mi editor, Edward Kastenmeier, quien me ofreció muchas sugerencias perspicaces y, junto con mi agente, Eric Simonoff, apoyó plenamente el proyecto en cada fase de su desarrollo. Por último, quiero expresar mi más sentido agradecimiento a mi familia por el apoyo recibido: mi madre, Rita Greene; mis hermanos, Wendy Greene, Susan Greene y Joshua Greene; mis hijos, Alec Day Greene y Sophia Day Greene; y mi maravillosa esposa y querida amiga, Tracy Day.

Bibliografía

Aaronson, Scott, «Why I Am Not an Integrated Information Theorist (or, The Unconscious Expander)», Shtetl-Optimized. <https:/www .scottaaronson.com/blog/?p=1799>

Abbot, P., J. Abe, J. Alcock *et al.*, «Inclusive fitness theory and eusociality», *Nature* 471 (2010), pp. E1-E4.

Adams, Douglas, *Life, the Universe and Everything*, Del Rey, Nueva York, 2005 [hay trad. cast.: *La vida, el universo y todo lo demás*, Anagrama, Barcelona, 2005].

Adams, Fred C., y Gregory Laughlin, «A dying universe: The long-term fate and evolution of astrophysical objects», *Reviews of Modern Physics* 69 (1997), pp. 337-372.

—, *The Five Ages of the Universe: Inside the Physics of Eternity*, Free Press, Nueva York, 1999.

Albert, David, *Time and Chance*, MA: Harvard University Press, Cambridge, 2000.

Alberts, Bruce *et al.*, *Molecular Biology of the Cell* (5.ª ed.), Garland Science, Nueva York, 2007 [hay trad. cast.: *Biología molecular de la célula*, Omega, Barcelona, 2010].

Albrecht, A., y L. Sorbo, «Can the Universe Afford Inflation?», *Physical Review D* 70 (2004), 063528.

Albrecht, A., y P. Steinhardt, «Cosmology for Grand Unified Theories with Radiatively Induced Symmetry Breaking», *Physical Review Letters* 48 (1982), p. 1220.

Andreassen, A., W. Frost y M. D. Schwartz, «Scale Invariant Instantons and the Complete Lifetime of the Standard Model», *Physical Review D* 97 (2018), 056006.

Aoyama, Tatsumi, Masashi Hayakawa, Toichiro Kinoshita y Makiko Nio, «Tenth-order electron anomalous magnetic moment: Contribution of diagrams without closed lepton loops», *Physical Review D* 91 (2015), 033006.

Aquinas, T., *Truth*, vol. II. Traducción de James V. McGlynn, S. J., Henry Regnery Company, Chicago, 1953 [hay trad. cast.: Tomás de Aquino,

santo, *Cuestiones disputadas sobre la verdad II*, EUNSA, Pamplona, 2016].
Ariès, Philippe, *The Hour of Our Death*, trad. Helen Weaver, Alfred A. Knopf, Nueva York, 1981 [hay trad. cast.: *El hombre ante la muerte*, Taurus, Barcelona, 1992].
Aristotle, *Nicomachean Ethics*, trad. de C. D. C. Reeve, Hackett Publishing, Indianápolis, IN, 2014 [hay trad. cast.: Aristóteles, *Ética a Nicómaco*, Gredos, Madrid, 2010].
Armstrong, Karen, *A Short History of Myth*, The Text Publishing Company, Melbourne, 2005 [hay trad. cast.: *Breve historia del mito*, Salamandra, Barcelona, 2005].
Arnulf, Isabelle, Colette Buda y Jean-Pierre Sastre, «Michel Jouvet: An explorer of dreams and a great storyteller», *Sleep Medicine* 49 (2018), pp. 4-9.
Atran, Scott, *In Gods We Trust: The Evolutionary Landscape of Religion*, Oxford University Press, Oxford, 2002.
Augustine, *Confessions*, trad. F. J. Sheed, Hackett Publishing, Indianápolis, IN, 2006 [hay trad. cast.: San Agustín, *Confesiones*, Planeta, Barcelona, 1993].
Auton, A., L. Brooks, R. Durbin *et al.*, «A global reference for human genetic variation», *Nature* 526, n.º 7571 (octubre de 2015), p. 68.
Axelrod, Robert, *The Evolution of Cooperation*, ed. rev. Perseus Books Group, 2006 [trad. cast. de la ed. original: *La evolución de la cooperación: el dilema del prisionero y la teoría de juegos*, Alianza, Madrid, 1996].
Axelrod, Robert, y William D. Hamilton, «The Evolution of Cooperation», *Science* 211 (marzo de 1981), pp. 1390-1396.
Baars, Bernard J., *In the Theater of Consciousness*, Oxford University Press, Nueva York, 1997.
Barrett, Justin L., *Why Would Anyone Believe in God?* AltaMira Press, Lanham, MD, 2004.
Barrow, John D., y Sigbjørn Hervik, «Indefinite information processing in ever-expanding universes», *Physics Letters B* 566, n.º 1-2 (24 de julio de 2003), pp. 1-7.
Barrow, John D., y Frank J. Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press, Oxford, 1988.
Becker, Ernest, *The Denial of Death*, Free Press, 1973 [hay trad. cast.: *La negación de la muerte*, Kairós, Barcelona, 2003].
Bekenstein, Jacob D., «Black Holes and Entropy», *Physical Review D* 7 (15 de abril de 1973), p. 2333.
Bellow, Saul, discurso de aceptación del premio Nobel, 12 de diciembre de 1976, en Sture Allén (ed.), *Nobel Lectures, Literature 1968-1980*,

World Scientific Publishing Co., Singapur, 1993.

Bennett, Charles H., y Rolf Landauer, «The Fundamental Physical Limits of Computation», *Scientific American* 253, n.º 1 (julio de 1985), pp. 48-56 [hay trad. cast: «Limitaciones físicas fundamentales de los procesos de cómputo», *Investigación y Ciencia*, septiembre de 1985].

Bering, Jesse, *The Belief Instinct*, W. W. Norton, Nueva York, 2011 [hay trad. cast.: *El instinto de creer: la psicología de la fe, el destino y el significado de la vida*, Paidós, Barcelona, 2012].

Berwick, R., y N. Chomsky, *Why Only Us?* MIT Press, Cambridge, MA, 2015 [hay trad. cast.: *¿Por qué solo nosotros? Evolución y lenguaje*, Kairós, Barcelona, 2016].

Bierce, Ambrose, *The Devil's Dictionary*, The Peter Pauper Press, Mount Vernon, NY, 1958 [hay trad. cast.: *El diccionario del Diablo*, Cátedra, Madrid, 2010].

Bigham, Abigail *et al.*, «Identifying signatures of natural selection in Tibetan and Andean populations using dense genome scan data», *PLoS Genetics* 6, n.º 9 (9 de septiembre de 2010), e1001116.

Blackmore, Susan, *The Meme Machine*, Oxford University Press, Oxford, 1999 [hay trad. cast.: *La máquina de los memes*, Paidós, Barcelona, 2000].

Boddy, Kimberly K., y Sean M. Carroll, «Can the Higgs Boson Save Us from the Menace of the Boltzmann Brains?» 2013, arXiv:1308.468.

Boddy, K. K., S. M. Carroll y J. Pollack, «De Sitter Space Without Dynamical Quantum Fluctuations», *Foundations of Physics* 46, n.º 6 (2016), p. 702.

Boltzmann, Ludwig, «On Certain Questions of the Theory of Gases», *Nature* 51 (1895), pp. 413-415.

—, «Entgegnung auf die wärmetheoretischen Betrachtungen des Hrn. E. Zermelo», *Annalen der Physik* 57 (1896), pp. 773-784.

Borges, Jorge Luis, «The Immortal», en *Labyrinths: Selected Stories and Other Writings*, New Directions Paperbook, Nueva York, 2017 [original en castellano: «El inmortal», en *El Aleph*, Lumen, Barcelona, 2019].

Born, Max, «Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge», *Zeitschrift für Physik* 37, n.º 12 (1926), p. 863-867.

Bousso, R., y B. Freivogel, «A Paradox in the Global Description of the Multiverse», *Journal of High Energy Physics* 6 (2007), 018.

Boyd, Brian, «The evolution of stories: from mimesis to language, from fact to fiction», *WIREs Cognitive Science* 9 (2018), pp. 7-8, e1444.

—, «Evolutionary Theories of Art», en Jonathan Gottschall y David Sloan Wilson (eds.), *The Literary Animal: Evolution and the Nature of Narrative*, Northwestern University Press, Evanston, IL, 2005, p. 147.

—, *On the Origin of Stories*, Belknap Press, Cambridge, 2010, p. 125.
Boyer, Pascal, «Functional Origins of Religious Concepts: Ontological and Strategic Selection in Evolved Minds», *Journal of the Royal Anthropological Institute* 6, n.º 2 (junio de 2000), pp. 195-214.
—, *Religion Explained: The Evolutionary Origins of Religious Thought*, Basic Books, Nueva York, 2007 [hay trad. cast.: *Y el hombre creó a los dioses*, Penguin Random House, México, 2007].
Bruner, Jerome, *Making Stories: Law, Literature, Life*, Farrar, Straus and Giroux, Nueva York, 2002.
—, «The Narrative Construction of Reality», *Critical Inquiry* 18, n.º 1 (otoño de 1991), pp. 1-21.
Buss, David, *Evolutionary Psychology: The New Science of Mind*, Allyn & Bacon, 2012.
Cairns-Smith, A. G., *Seven Clues to the Origin of Life*, Cambridge University Press, Cambridge, 1990.
Calaprice, Alice (ed.), *The New Quotable Einstein*, Princeton University Press, Princeton, 2005, p. 149 [hay trad. cast.: *Albert Einstein: el libro definitivo de citas*, Plataforma, Barcelona, 2014].
Caldwell, Robert R., Marc Kamionkowski y Nevin N. Weinberg, «Phantom Energy and Cosmic Doomsday», *Physical Review Letters* 91 (2003), 071301.
Campbell, Joseph, *The Hero with a Thousand Faces*, New World Library, Novato, CA, 2008, p. 23 [hay trad. cast.: *El héroe de las mil caras: psicoanálisis del mito*, FCE, Madrid, 2003].
Camus, Albert, *Lyrical and Critical Essays*, Ellen Conroy Kennedy (trad.), Vintage Books, Nueva York, 1970 [hay trad. cast.: *Ensayos*, Aguilar, Barcelona, 1981].
—, *The Myth of Sisyphus*, Justin O’Brien (trad.), Hamish Hamilton, Londres, 1955, p. 18 [hay trad. cast.: *El mito de Sísifo*, Alianza, Madrid, 1996].
Čapek, Karel, *The Makropulos Case*, en *Four Plays: R. U. R.; The Insect Play; The Makropulos Case; The White Plague*, Bloomsbury, Londres, 2014.
Carlip, Steven, «Transient Observers and Variable Constants, or Repelling the Invasion of the Boltzmann’s Brains», *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 06 (2007), 001.
Carnot, Sadi, *Reflections on the Motive Power of Fire*, Dover Publications, Inc., Mineola, NY, 1960 [hay trad. cast.: *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas adecuadas para desarrollar esta potencia y otras notas de carácter científico*, Alianza, Madrid, 1987].
Carroll, Noël, «The Arts, Emotion, and Evolution», en Greg Currie, Matthew Kieran, Aaron Meskin y Jon Robson (eds.), *Aesthetics and the*

Sciences of Mind, Oxford University Press, Oxford, 2014.

Carroll, Sean, *The Big Picture: On the Origins of Life, Meaning, and the Universe Itself*, Dutton, Nueva York, 2016.

Carter, B. «Axisymmetric Black Hole Has Only Two Degrees of Freedom», *Physical Review Letters* 26 (1971), p. 331.

Casals, Pablo, Festival Bach de Prades, 1950; citado en Paul Elie, *Reinventing Bach*, Farrar, Straus and Giroux, Nueva York, 2012.

Cavosie, A. J., J. W. Valley y S. A. Wilde, «The Oldest Terrestrial Mineral Record: Thirty Years of Research on Hadean Zircon from Jack Hills, Western Australia», en M. J. Van Kranendonk (ed.), *Earth's Oldest Rocks*, Elsevier, Nueva York, 2018, pp. 255-278.

Ceresole, A., G. Dall'Agata, A. Giryavets *et al.*, «Domain walls, near-BPS bubbles, and probabilities in the landscape», *Physical Review D* 74 (2006), 086010.

Chalmers, David J., «Facing Up to the Problem of Consciousness», *Journal of Consciousness Studies* 2, n.º 3 (1995), pp. 200-219.

—, *The Conscious Mind: In Search of a Fundamental Theory*, Oxford University Press, Oxford, 1997 [hay trad. cast.: *La mente consciente: en busca de una teoría fundamental*, GEDISA, Barcelona, 1999].

Chandrasekhar, Subrahmanyan, «The Maximum Mass of Ideal White Dwarfs», *Astrophysical Journal* 74 (1931), pp. 81-82.

Cheney, Dorothy L., y Robert M. Seyfarth, *How Monkeys See the World: Inside the Mind of Another Species*, University of Chicago Press, Chicago, 1992.

Ćirković, Milan M., «Resource Letter: PEs-1, Physical Eschatology», *American Journal of Physics* 71 (2003), p. 122.

Cloak, F. T., Jr., «Cultural Microevolution», *Research Previews* 13 (noviembre de 1966), pp. 7-10.

Clottes, Jean, *What Is Paleolithic Art? Cave Paintings and the Dawn of Human Creativity*, University of Chicago Press, Chicago, 2016.

Coleman, Sidney, «Fate of the False Vacuum», *Physical Review D* 15 (1977), p. 2929; *erratum*, *Physical Review D* 16 (1977), p. 1248.

Conrad, Joseph, *The Nigger of the «Narcissus»*, Dover Publications, Inc., Mineola, NY, 1999 [hay trad. cast.: *El negro del «Narcissus»*, Alianza, Barcelona, 2006].

Coqueugniot, Hélène *et al.*, «Earliest cranio-encephalic trauma from the Levantine Middle Palaeolithic: 3D reappraisal of the Qafzeh 11 skull, consequences of pediatric brain damage on individual life condition and social care», *PloS One* 9 (23 de julio de 2014), 7 e102822.

Crick, F. H. C., Leslie Barnett, S. Brenner y R. J. Watts-Tobin, «General nature of the genetic code for proteins», *Nature* 192 (1961), pp. 1227-1232.

Cronin, H., *The Ant and the Peacock: Altruism and Sexual Selection from Darwin to Today*, Cambridge University Press, Cambridge, 1991.

Crooks, G. E., «Entropy production fluctuation theorem and the nonequilibrium work relation for free energy differences», *Physical Review E* 60 (1999), 2721.

Damrosch, David, *The Buried Book: The Loss and Rediscovery of the Great Epic of Gilgamesh*, Henry Holt and Company, Nueva York, 2007.

Darwin, Charles, *The Descent of Man and Selection in Relation to Sex* (ed. ilus.), D. Appleton and Company, Nueva York, 1871, p. 59 [hay trad. cast.: *El origen del hombre*, Crítica, Barcelona, 2009].

—, *The Expression of the Emotions in Man and Animals*, Oxford University Press, Oxford, 1998 [hay trad. cast.: *La expresión de las emociones en los animales y en el hombre*, Alianza, Madrid, 1998].

—, carta a Alfred Wallace, 27 de marzo de 1869. <https://www.darwinproject.ac.uk/letter/?docId=letters/DCP-LETT-6684.xml;query=child;brand=default>

—, *The Origin of Species*, Pocket Books, Nueva York, 2008 [hay trad. cast.: *El origen de las especies*, Planeta-DeAgostini, Barcelona, 2002].

Davies, Stephen, *The Artful Species: Aesthetics, Art, and Evolution*, Oxford University Press, Oxford, 2012.

Dawkins, Richard, *The God Delusion*, Houghton Mifflin Harcourt, Nueva York, 2006, pp. 230-233 [hay trad. cast.: *El espejismo de Dios*, Espasa, Barcelona, 2009].

—, *The Selfish Gene*, Oxford University Press, Oxford, 1976 [hay trad. cast.: *El gen egoísta*, Salvat, Barcelona, 1988].

De Caro, M., y D. Macarthur (eds.), *Naturalism in Question*, Harvard University Press, Cambridge, MA, 2004.

Deamer, David, *Assembling Life: How Can Life Begin on Earth and Other Habitable Planets?*, Oxford University Press, Oxford, 2018.

Dehaene, Stanislas, *Consciousness and the Brain*, Penguin Books, Nueva York, 2014.

Dehaene, Stanislas, y Jean-Pierre Changeux, «Experimental and Theoretical Approaches to Conscious Processing», *Neuron* 70, n.º 2 (2011), pp. 200-227.

Dennett, Daniel, *Breaking the Spell: Religion as a Natural Phenomenon, Penguin Books*, Nueva York, 2006 [hay trad. cast.: *Romper el hechizo: la religión como un fenómeno natural*, Katz, Madrid, 2007].

—, *Consciousness Explained*, Little, Brown and Co., Boston, 1991 [hay trad. cast.: *La conciencia explicada: una teoría interdisciplinar*, Paidós, Barcelona, 1995].

—, *Elbow Room*, MIT Press, Cambridge, 1984.

—, *Freedom Evolves*, Penguin Books, Nueva York, 2003.

—, *The Intentional Stance*, MIT Press, Cambridge, MA, 1989 [hay trad. cast.: *La actitud intencional*, GEDISA, Barcelona, 1991].
Deutsch, David, *The Beginning of Infinity*, Viking, Nueva York, 2011 [hay trad. cast.: *El comienzo del infinito: explicaciones que transforman el mundo*, Ediciones de Intervención Cultural, Vilassar de Dalt, 2012].
Deutscher, Guy, *The Unfolding of Language: An Evolutionary Tour of Mankind's Greatest Invention*, Henry Holt and Company, Nueva York, 2005.
Dickinson, Emily, *The Poems of Emily Dickinson. Reading edition*, edición de R. W. Franklin, The Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge, MA, 1999 [hay trad. cast.: *Poemas*, Visor, Madrid, 1986].
Dissanayake, Ellen, *Art and Intimacy: How the Arts Began*, University of Washington Press, Seattle, 2000.
Distin, Kate, *The Selfish Meme: A Critical Reassessment*, Cambridge University Press, Cambridge, 2005 [hay trad. cast.: *El meme egoísta*, Ediciones de Intervención Cultural, Vilassar de Mar, 2010].
Doniger, Wendy (trad.), *The Rig Veda*, Penguin Classics, Nueva York, 2005 [hay trad. cast.: *Himnos del Rig Veda (selección)*, Las Cuarenta, Buenos Aires, Argentina, 2018].
Dostoevsky, Fyodor, *Crime and Punishment*, Michael R. Katz (trad.), Liveright, Nueva York, 2017 [hay trad. cast.: *Crimen y castigo*, Alianza, Madrid, 2018].
Dunbar, R. I. M., «Gossip in Evolutionary Perspective», *Review of General Psychology* 8, n.º 2 (2004), pp. 100-110.
—, *Grooming, Gossip, and the Evolution of Language*, Harvard University Press, Cambridge, MA, 1997.
Dunbar, R. I. M., N. D. C. Duncan y A. Marriott, «Human Conversational Behavior», *Human Nature* 8, n.º 3 (1997), pp. 231-246.
Dupré, John, «The Miracle of Monism», en Mario de Caro y David Macarthur (eds.), *Naturalism in Question*, Harvard University Press, Cambridge, MA, 2004.
Durant, Will, *The Life of Greece*, vol. 2 de *The Story of Civilization*, Simon & Schuster, 2011, pos. 8181-8182, Kindle.
Dutton, Denis, *The Art Instinct*, Bloomsbury Press, Nueva York, 2010 [hay trad. cast.: *El instinto del arte*, Paidós, Barcelona, 2010].
Dyson, Freeman, «Time without end: Physics and biology in an open universe», *Reviews of Modern Physics* 51 (1979), pp. 447-460.
Dyson, L., M. Kleban y L. Susskind, «Disturbing Implications of a Cosmological Constant», *Journal of High Energy Physics* 0210 (2002), 011
Eddington, A., «The End of the World: From the Standpoint of Mathematical Physics», *Nature* 127, n.º 1931 [3203], pp. 447-453.

Einstein, Albert, *Autobiographical Notes*, Open Court Publishing, La Salle, IL, 1979 [hay trad. cast.: *Notas autobiográficas*, Alianza, Madrid, 2016].
Elgendi, Mohamed *et al.*, «Subliminal Priming-State of the Art and Future Perspectives», *Behavioral Sciences* (Basel, Suiza) 8, n.º 6 (30 de mayo de 2018), p. 54.
Ellenberger, Henri, *The Discovery of the Unconscious*, Basic Books, Nueva York, 1970 [hay trad. cast.: *El descubrimiento del inconsciente*, Gredos, Madrid, 1976].
Else, Jon (dir.), *The Day After Trinity*, KETH, Houston, 1981.
Emerson, Ralph Waldo, *The Conduct of Life*, Houghton Mifflin Company, Boston y Nueva York, 1922) nota 38, p. 424 [hay trad. cast.: *La conducta de la vida*, Pre-Textos, Valencia, 2004].
Emler, N., «The Truth About Gossip», *Social Psychology Section Newsletter* 27 (1992), pp. 23-37.
England, J. L., «Statistical physics of self-replication», *Journal of Chemical Physics* 139 (2013), 121923.
Epicurus, *The Essential Epicurus*, Eugene O'Connor (trad.), Prometheus Books, Amherst, NY, 1993 hay trad. cast. en Epicuro, *Obras completas*, Cátedra, Madrid, 2019].
Falk, Dean, *Finding Our Tongues: Mothers, Infants and the Origins of Language*, Basic Books, Nueva York, 2009.
—, «Prelinguistic evolution in early hominins: Whence motherese?», *Behavioral and Brain Sciences* 27 (2004), pp. 491-541.
Fisher, R. A., *The Genetical Theory of Natural Selection*, Clarendon Press, Oxford, 1930.
Fisher, Simon E., Faraneh Vargha-Khadem, Kate E. Watkins, Anthony P. Monaco y Marcus E. Pembrey, «Localisation of a gene implicated in a severe speech and language disorder», *Nature Genetics* 18 (1998), pp. 168-170.
Fowler, R. H., «On Dense Matter», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 87, n.º 2 (1926), pp. 114-122.
Freese, K., y W. Kinney, «The ultimate fate of life in an accelerating universe», *Physics Letters B* 558, n.º 1-2 [10 de abril de 2003], pp. 1-8.
Friedmann, Alexander, trad. de Brian Doyle, «On the Curvature of Space», *Zeitschrift für Physik* 10 (1922), pp. 377-386.
Frijda, N., A. S. R. Manstead y S. Bem, «The influence of emotions on belief», en N. Frijda, A. Manstead y S. Bem (eds.), *Emotions and Beliefs: How Feelings Influence Thoughts* (Studies in Emotion and Social Interaction), Cambridge University Press, Cambridge, 2000, pp. 1-9.

Frijda, N.y B. Mesquita, «Beliefs through emotions», en N. Frijda, A. Manstead y S. Bem (eds.), *Emotions and Beliefs: How Feelings Influence Thoughts* (Studies in Emotion and Social Interaction), Cambridge University Press, Cambridge, 2000, pp. 45-77.

Fu, Wenqing, Timothy D. O'Connor, Goo Jun *et al.*, «Analysis of 6,515 exomes reveals the recent origin of most human protein-coding variants», *Nature* 493 (10 de enero de 2013), pp. 216-220.

Garriga, Jaume, y Alexander Vilenkin, «Many Worlds in One», *Physical Review D* 64, n.º 4 (2001), 043511.

Garriga, J., V. F. Mukhanov, K. D. Olum y A. Vilenkin, «Eternal Inflation, Black Holes, and the Future of Civilizations», *International Journal of Theoretical Physics* 39, n.º 7 (2000), pp. 1887-1900.

George, Andrew (trad.), *The Epic of Gilgamesh: The Babylonian Epic Poem and Other Texts in Akkadian and Sumerian*, Penguin Classics, Londres, 2003 [hay trad. cast.: *El poema de Gilgamesh*, Cátedra, Madrid, 2015].

Georgi, Howard, y Sheldon Glashow, «Unity of All Elementary-Particle Forces», *Physical Review Letters* 32, n.º 8 (1974), p. 438.

Gottschall, Jonathan, *The Storytelling Animal, Mariner Books*, Houghton Mifflin Harcourt, Boston y Nueva York, 2013, p. 63.

Gould, Stephen J., *Conversations About the End of Time*, Fromm International, Nueva York, 1999.

—, «The spice of life», *Leader to Leader* 15 (2000), pp. 14-19.

—, *The Richness of Life: The Essential Stephen Jay Gould*, W. W. Norton, Nueva York, 2006, pp. 232-233.

Gould, S. J., y R. C. Lewontin, «The Spandrels of San Marco and the Panglossian Paradigm: A Critique of the Adaptationist Programme», *Proceedings of the Royal Society B* 205, n.º 1161 (21 de septiembre de 1979), pp. 581-598.

Graziano, M., *Consciousness and the Social Brain*, Oxford University Press, Nueva York, 2013.

Greene, Brian, *The Elegant Universe*, Vintage, Nueva York, 2000 [hay trad. cast.: *El universo elegante*, Crítica, Barcelona, 2006].

—, *The Fabric of the Cosmos*, Alfred A. Knopf, Nueva York, 2005 [hay trad. cast.: *El tejido del cosmos: espacio, tiempo y la textura de la realidad*, Crítica, Barcelona, 2006].

—, *The Hidden Reality*, Alfred A. Knopf, Nueva York, 2011 [hay trad. cast.: *La realidad oculta: universos paralelos y las profundas leyes del cosmos*, Crítica, Barcelona, 2011].

Greene, Ellen, «Sappho 58: Philosophical Reflections on Death and Aging», en Ellen Greene y Marilyn B. Skinner (eds.), *The New Sappho on Old Age: Textual and Philosophical Issues*, Hellenic Studies Series 38,

Center for Hellenic Studies, Washington, DC, 2009. https://chs.harvard.edu/CHS/article/display/6036.11-ellen-greene-sappho-58-philosophical-reflections-on-death-and-aging#n.1

Greene, Ellen (ed.), *Reading Sappho: Contemporary Approaches*, University of California Press, Berkeley, 1996.

Guenther, Mathias Georg, *Tricksters and Trancers: Bushman Religion and Society*, Indiana University Press, Bloomington, IN, 1999, pp. 180-198.

Guth, Alan H., «Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems», *Physical Review D* 23 (1981), p. 347.

—, *The Inflationary Universe*, Basic Books, Nueva York, 1998 [hay trad. cast.: *El universo inflacionario*, Debate, Barcelona, 1999].

Guthrie, Stewart, *Faces in the Clouds: A New Theory of Religion*, Oxford University Press, Nueva York, 1993.

Haidt, Jonathan, «The Emotional Dog and Its Rational Tail: A Social Intuitionist Approach to Moral Judgment», *Psychological Review* 108, n.º 4 (2001), 814-834.

—, *The Righteous Mind: Why Good People Are Divided by Politics and Religion*, Pantheon Books, Nueva York, 2012.

Haldane, J. B. S., *The Causes of Evolution*, Longmans, Green & Co., Londres, 1932.

Halligan, Peter, y John Marshall, «Blindsight and insight in visuospatial neglect», *Nature* 336, n.º 6201 (22-29 de diciembre de 1988), pp. 766-767.

Hameroff, S., y Roger Penrose, «Consciousness in the universe: A review of the 'Orch OR' theory», *Physics of Life Reviews* 11 (2014), pp. 39-78.

Hamilton, W. D., «The Genetical Evolution of Social Behaviour», *Journal of Theoretical Biology* 7, n.º 1 (1964), pp. 1-16.

Harburg, Yip, «E. Y. Harburg, Lecture at UCLA on Lyric Writing, February 3, 1977», transcripción, pp. 5-7, cinta 7-3-10.

—, «Yip at the 92nd Street YM-YWHA, December 13, 1970», transcripción 1-10-3, p. 3, cintas 7-2-10 y 7-2-20.

Hawking, S. W., «Particle Creation by Black Holes», *Communications in Mathematical Physics* 43 (1975), pp. 199-220.

Hawking, Stephen, y Leonard Mlodinow, *The Grand Design*, Bantam Books, Nueva York, 2010 [hay trad. cast.: *El gran diseño*, Crítica, Barcelona, 2010].

Hawks, John, Eric T. Wang, Gregory M. Cochran *et al.*, «Recent acceleration of human adaptive evolution», *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104, n.º 52 (diciembre de 2007), pp. 20753-20758.

Heisenberg, Werner, *Physics and Philosophy: The Revolution in Modern Science*, Penguin Books, Londres, 1958.

Hirshfield, Jane, *Nine Gates: Entering the Mind of Poetry*, Harper Perennial, Nueva York, 1998.

Hogan, Patrick Colm, *The Mind and Its Stories*, Cambridge University Press, Cambridge, 2003.

Hrdy, Sarah, *Mothers and Others, The Evolutionary Origins of Mutual Understanding*, Belknap Press, Cambridge, MA, 2009.

Hulse, R. A., y J. H. Taylor, «Discovery of a pulsar in a binary system», *Astrophysical Journal* 195 (1975), L51.

Ijjas, Anna, y Paul Steinhardt, «A New Kind of Cyclic Universe» (2019), arXiv:1904.0822[gr-qc].

Islam, Jamal N., «Possible Ultimate Fate of the Universe», *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society* 18 (marzo de 1977), pp. 3-8.

Israel, W., «Event Horizons in Static Electrovac Space-Times», *Communications in Mathematical Physics* 8 (1968), p. 245.

—, «Event Horizons in Static Vacuum Space-Times», *Physical Review* 164 (1967), p. 1776.

Jackson, Frank, «Epiphenomenal Qualia», *Philosophical Quarterly* 32 (1982), pp. 127-136.

—, «Postscript on Qualia», en *Mind, Method, and Conditionals, Selected Essays*, Routledge, Londres, 1998, pp. 76-79.

James, William, *The Varieties of Religious Experience: A Study in Human Nature*, Longmans, Green, and Co., Nueva York, 1905, p. 498 [hay trad. cast.: *Las variedades de la experiencia religiosa: estudio de la naturaleza humana*, Península, Barcelona, 2002].

Jarzynski, C., «Nonequilibrium equality for free energy differences», *Physical Review Letters* 78 (1997), p. 2690.

Jaspers, Karl, *The Origin and Goal of History*, Routledge, Aingdon, 2010, p. 2 [hay trad. cast.: *Origen y meta de la historia*, Acantilado, Barcelona, 2017].

Jeong, Choongwon, y Anna Di Rienzo, «Adaptations to local environments in modern human populations», *Current Opinion in Genetics & Development* 29 (2014), pp. 1-8.

Jones, Barbara E., «The mysteries of sleep and waking unveiled by Michel Jouvet», *Sleep Medicine* 49 (2018), pp. 14-19.

Joordens, Josephine C. A. *et al.*, «*Homo erectus* at Trinil on Java used shells for tool production and engraving», *Nature* 518 (12 de febrero de 2015), pp. 228-231.

Jørgensen, Timmi G., y Ross P. Church, «Stellar escapers from M67 can reach solar-like Galactic orbits», arxix.org, arXiv:1905.09586.

Joyce, G. F., y J. W. Szostak, «Protocells and RNA Self-Replication», *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology* 10, n.º 9 (2018).

Jung, Carl, «The Soul and Death», en Gerald Adler and R. F. C. Hull (eds.), *Complete Works of C. G. Jung*, Princeton University Press, Princeton, 1983.

Kachman, Tal, Jeremy A. Owen y Jeremy L. England, «Self-Organized Resonance During Search of a Diverse Chemical Space», *Physical Review Letters* 119, n.º 3 (2017), 038001-1.

Kafka, Franz, *The Blue Octavo Notebooks*, Ernst Kaiser y Eithne Wilkens (trad.), edición de Max Brod, Exact Change, Cambridge, MA, 1991, p. 91 [hay trad. cast.: *Cuadernos en octavo*, Alianza, Madrid, 2018].

Keller, Helen, carta a la New York Symphony Orchestra, 2 de febrero de 1924, archivos digitales de la Fundación Americana para la Ceguera, nombre de archivo: HK01-07_B114_F08_015_002.tif.

Kennedy, J. Gerald, *Poe, Death, and the Life of Writing*, Yale University Press, 1987, p. 48.

Kierkegaard, Søren, *The Concept of Dread*, traducción, introducción y notas de Walter Lowrie, Princeton University Press, Princeton, 1957 [hay trad. cast.: *El concepto de la angustia*, Alianza, Madrid, 2012].

Kitcher, P., «Between Fragile Altruism and Morality: Evolution and the Emergence of Normative Guidance», *Evolutionary Ethics and Contemporary Biology* (2006), pp. 159-177.

—, «Biology and Ethics», en *The Oxford Handbook of Ethical Theory*, Oxford University Press, Oxford, 2006.

Klinkhamer, F. R., y N. S. Manton, «A saddle-point solution in the Weinberg-Salam theory», *Physical Review D* 30 (1984), p. 2212.

Koch, Christof, *Consciousness: Confessions of a Romantic Reductionist*, MIT Press, Cambridge, MA, 2012.

Kragh, Helge, «Naming the Big Bang», *Historical Studies in the Natural Sciences* 44, n.º 1 (febrero de 2014), p. 3.

Krause, Johannes, Carles Lalueza-Fox, Ludovic Orlando *et al.*, «The Derived FOXP2 Variant of Modern Humans Was Shared with Neandertals», *Current Biology* 17 (2007), pp. 1908-1912.

Krauss, Lawrence M., y Glenn D. Starkman, «Life, the Universe, and Nothing: Life and Death in an Ever-Expanding Universe», *Astrophysical Journal* 531 (2000), pp. 22-30.

Krutch, Joseph Wood, «Art, Magic, and Eternity», *Virginia Quarterly Review* 8, n.º 4, (otoño de 1932).

Lai, C. S. L. *et al.*, «A novel forkhead-domain gene is mutated in a severe speech and language disorder», *Nature* 413 (2001), pp. 519-523.

Landon, H. C. Robbins, *Beethoven: A Documentary Study*, Macmillan Publishing Co., Inc., Nueva York, 1970.

Laurent, John., «A Note on the Origin of Memes'/Mnemes.'», *Journal of Memetics* 3 (1999), pp. 14-19.

Lemaître, Georges, «Rencontres avec Einstein», *Revue des questions scientifiques*, 129 (1958), pp. 129-132.

Leonard, Scott, y Michael McClure, *Myth and Knowing*, McGraw-Hill Higher Education, Nueva York, 2004, pp. 283-301.

Lewis, David, P*apers in Metaphysics and Epistemology*, Cambridge University Press, Cambridge, 1999.

—, «What Experience Teaches», *Proceedings of the Russellian Society* 13 (1988), pp. 29-57.

Lewis, S. M., y C. K. Cratsley, «Flash signal evolution, mate choice, and predation in fireflies», *Annual Review of Entomology* 53 (2008), pp. 293-321.

Lewis-Williams, David, *The Mind in the Cave: Consciousness and the Origins of Art*, Thames & Hudson, 2002 [hay trad. cast.: *La mente en la caverna: la conciencia y los orígenes del arte*, Akal, Tras Cantos, Madrid, 2011].

Linde, A., «A new inflationary universe scenario: A possible solution of the horizon, flatness, homogeneity, isotropy and primordial monopole problems», *Physics Letters B* 108 (1982), p. 389.

—, «Sinks in the Landscape, Boltzmann Brains, and the Cosmological Constant Problem», *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 0701 [2007], 022.

Loeb, Abraham, «Cosmology with hypervelocity stars», *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 04 (2011), 023.

Loewi, Otto, «An Autobiographical Sketch», *Perspectives in Biology and Medicine* 4, n.º 1 (otoño de 1960), pp. 3-25.

Louie, Kenway, y Matthew A. Wilson, «Temporally Structured Replay of Awake Hippocampal Ensemble Activity During Rapid Eye Movement Sleep», *Neuron* 29 (2001), pp. 145-156.

Mackay, Alan Lindsay, *The Harvest of a Quiet Eye: A Selection of Scientific Quotations*, Institute of Physics, Bristol, 1977, p. 117.

Maddox, Brenda, *Rosalind Franklin: The Dark Lady of DNA*, Harper Perennial, Nueva York, 2003.

Marcel, Anthony J., «Conscious and Unconscious Perception: Experiments on Visual Masking and Word Recognition», *Cognitive Psychology* 15 (1983), pp. 197-237.

Martin, W., y M. J. Russell, «On the origin of biochemistry at an alkaline hydrothermal vent», *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 367 (2007), p. 1187.

Matthaei, J. Heinrich, Oliver W. Jones, Robert G. Martin y Marshall W. Nirenberg, «Characteristics and Composition of Coding Units», *Proceedings of the National Academy of Sciences* 48, n.º 4 (1962), pp. 666-677.

Melville, Herman, *Moby-Dick*, Wordsworth Classics, Hertfordshire, UK, 1993 [hay trad. cast.: *Moby Dick o la ballena blanca*, Alfaguara, Barcelona, 1997].

Mendez, Fernando L. *et al.*, «The Divergence of Neandertal and Modern Human Y Chromosomes», *American Journal of Human Genetics* 98, n.º 4 (2016), pp. 728-734.

Miller, Geoffrey, *The Mating Mind: How Sexual Choice Shaped the Evolution of Human Nature*, Anchor, Nueva York, 2000.

Mitchell, P., «Coupling of phosphorylation to electron and hydrogen transfer by a chemiosmotic type of mechanism», *Nature* 191 [1961], pp. 144-148.

Morrison, Toni, discurso de aceptación del premio Nobel, 7 de diciembre de 1993. <https://www.nobelprize.org/prizes/literature/1993/morrison/lecture/>

Müller, Max (trad.), *The Upanishads*, The Clarendon Press, Oxford, 1879 [hay trad. cast.: *Los upanishads*, MRA, Barcelona, 1995].

Nabokov, Vladimir, *Speak, Memory: An Autobiography Revisited*, Alfred A. Knopf, Nueva York, 1999 [hay trad. cast.: *Habla, memoria: una autobiografía revisitada*, Anagrama, Barcelona, 1988].

Naccache, L., y S. Dehaene, «The Priming Method: Imaging Unconscious Repetition Priming Reveals an Abstract Representation of Number in the Parietal Lobes», *Cerebral Cortex* 11, n.º 10 (2001), pp. 966-974.

—, «Unconscious Semantic Priming Extends to Novel Unseen Stimuli», *Cognition* 80, n.º 3 (2001), pp. 215-229.

Nagel, Thomas, *Mortal Questions*, Cambridge University Press, Cambridge, 1979.

—, «What Is It Like to Be a Bat?» *Philosophical Review* 83, n.º 4 (1974), pp. 435-450.

Nelson, Philip, *Biological Physics: Energy, Information, Life*, W. H. Freeman and Co., Nueva York, 2014.

Nemirow, Laurence, «Physicalism and the cognitive role of acquaintance», en W. Lycan (ed.), *Mind and Cognition*, Blackwell, Oxford, 1990, pp. 490-499.

—, «Review of Nagel’s Mortal Questions», *Philosophical Review* 89 (1980), pp. 473-477.

Newton, Isaac, carta a Henry Oldenburg, 6 de febrero de 1671. <http://www.newtonproject.ox.ac.uk/view/texts/normalized/NATP00003>

Nietzsche, Friedrich, *Twilight of the Idols*, trad. Duncan Large, Oxford University Press, Oxford, 1998, reimpresión de 2008 [hay trad. cast.: *El crepúsculo de los ídolos*, Alianza, Madrid, 1987].

Norenzayan, A., y I. G. Hansen, «Belief in supernatural agents in the face of death», *Personality and Social Psychology Bulletin* 32 (2006), pp. 174-

187.
Nowak, M. A., C. E. Tarnita y E. O. Wilson, «The evolution of eusociality», *Nature* 466 (2010), pp. 1057-1062.
Nozick, Robert, *Philosophical Explanations*, Belknap Press, Cambridge, MA, 1983, pp. 29-70.
—, «Philosophy and the Meaning of Life,» en David Benatar (ed.), *Life, Death, and Meaning: Key Philosophical Readings on the Big Questions*, The Rowman & Littlefield Publishing Group, Lanham, MD, 2010, pp. 73-74.
Nussbaumer, Harry, «Einstein's conversion from his static to an expanding universe», *European Physics Journal-History*, 39 (2014), pp. 37-62.
Oates, Joyce Carol, «Literature as Pleasure, Pleasure as Literature», *Narrative*. https://www.narrativemagazine.com/issues/stories-week-2015-2016/story-week/literature-pleasure-pleasure-literature-joyce-carol-oates
Oatley, K., «Why fiction may be twice as true as fact», *Review of General Psychology* 3 (1999), pp. 101-117.
Oizumi, Masafumi, Larissa Albantakis y Giulio Tononi, «From the Phenomenology to the Mechanisms of Consciousness: Integrated Information Theory 3.0», *PLoS Computational Biology* 10, n.º 5 (mayo de 2014).
Page, Don N., «Is our universe decaying at an astronomical rate?», *Physics Letters B* 669 (2008), pp. 197-200.
—, «The Lifetime of the Universe», *Journal of the Korean Physical Society* 49 (2006), pp. 711-714.
—, «Particle emission rates from a black hole: Massless particles from an uncharged, nonrotating hole», *Physical Review D* 13 n.º 2 (1976), pp. 198-206.
Page, Tim (ed.), *The Glenn Gould Reader*, Vintage Books, Nueva York, 1984.
Parker, Eric, Henderson J. Cleaves, Jason P. Dworkin *et al.*, «Primordial synthesis of amines and amino acids in a 1958 Miller H2S-rich spark discharge experiment», *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108, n.º 14 (abril de 2011), pp. 5526-5531.
Perlmutter, Saul *et al.*, «Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae», *Astrophysical Journal* 517, n.º 2 (1999), p. 565.
Perunov, Nikolay, Robert A. Marsland y Jeremy L. England, «Statistical Physics of Adaptation», *Physical Review X* 6 (junio de 2016), 021036-1.
Pichardo, Bárbara, Edmundo Moreno, Christine Allen *et al.*, «The Sun was not born in M67», *The Astronomical Journal* 143, n.º 3 (2012), p. 73.

Pinker, Steven, *How the Mind Works*, W. W. Norton, Nueva York, 1997, p. 525 [hay trad. cast.: *Cómo funciona la mente*, Destino, Barcelona, 2007].
—, «Language as an adaptation to the cognitive niche», en S. Kirby y M. Christiansen (eds.), *Language Evolution: States of the Art*, Oxford University Press, Nueva York, 2003, pp. 16-37.
—, *The Language Instinct*, W. Morrow and Co., Nueva York, 1994 [hay trad. cast.: *El instinto del lenguaje*, Alianza, Madrid, 1996].
Pinker, S., y P. Bloom, «Natural language and natural selection», *Behavioral and Brain Sciences* 13, n.º 4 (1990): pp. 707-784.
Plath, Sylvia, *The Collected Poems*, edición de Ted Hughes, Harper Perennial, 1992, p. 255 [hay trad. cast.: *Antología*, Visor, Madrid, 2009].
Prebble, John, y Bruce Weber, *Wandering in the Gardens of the Mind: Peter Mitchell and the Making of Glynn*, Oxford University Press, Oxford, 2003.
Premack, David, y Guy Woodruff, «Does the chimpanzee have a theory of mind?», *Cognition and Consciousness in Nonhuman Species*, número especial de *Behavioral and Brain Sciences* 1, n.º 4 (1978), pp. 515-526.
Proust, Marcel, *Remembrance of Things Past*, vol. 3: *The Captive, The Fugitive, Time Regained*, Vintage, Nueva York, 1982 [hay trad. cast.: *En busca del tiempo perdido*, Alianza, Madrid, 2011].
Prum, Richard, *The Evolution of Beauty: How Darwin's Forgotten Theory on Mate Choice Shapes the Animal World and Us*, Doubleday, Nueva York, 2017 [hay trad. cast.: *La evolución de la belleza: de cómo la teoría olvidada de Darwin explica la atracción sexual y cómo los animales y los humanos eligen pareja*, Ático de los Libros, Barcelona, 2019].
Pyszczynski, Tom, Sheldon Solomon y Jeff Greenberg, «Thirty Years of Terror Management Theory», *Advances in Experimental Social Psychology* 52 (2015), pp. 1-70.
Rank, Otto, *Art and Artist: Creative Urge and Personality Development*, trad. Charles Francis Atkinson, Alfred A. Knopf, Nueva York, 1932, p. 39.
—, *Psychology and the Soul*, William D. Turner (trad.), University of Pennsylvania Press, Filadelfia, 1950.
Rees, M. J., «The collapse of the universe: An eschatological study», *Observatory* 89 (1969), pp. 193-198.
Reinach, Salomon, *Cults, Myths and Religions*, Elizabeth Frost (trad.), David Nutt, Londres, 1912, pp. 124-138.
Revonsuo, Antti, Jarno Tuominen y Katja Valli, «The Avatars in the Machine-Dreaming as a Simulation of Social Reality», *Open MIND*

(2015), pp. 1-28.
Rodd, F. Helen, Kimberly A. Hughes, Gregory F. Grether y Colette T. Baril, «A possible non-sexual origin of mate preference: Are male guppies mimicking fruit?», *Proceedings of the Royal Society B* 269 (2002), pp. 475-481.
Roney, James R, «Likeable but Unlikely, a Review of the Mating Mind by Geoffrey Miller», *Psycoloquy* 13, n.º 10 (2002), artículo 5.
Rosenblatt, Abram, Jeff Greenberg, Sheldon Solomon *et al.*, «Evidence for Terror Management Theory I: The Effects of Mortality Salience on Reactions to Those Who Violate or Uphold Cultural Values», *Journal of Personality and Social Psychology* 57 (1989), pp. 681-690.
Rowland, Peter, *Bowerbirds*, CSIRO Publishing, Collingwood, Australia, 2008.
Russell, Bertrand, *Why I Am Not a Christian*, Simon & Schuster, 1957, p. 107 [hay trad. cast.: *Por qué no soy cristiano*, EDHASA, Barcelona, 1983].
—, *Human Knowledge*, Routledge, Nueva York, 2009 [hay trad. cast.: *El conocimiento humano*, Folio, Barcelona, 2002].
Ryan, Michael, *A Taste for the Beautiful*, Princeton University Press, Princeton, 2018.
Sackmann I.-J., A. I. Boothroyd y K. E. Kraemer, «Our Sun. III. Present and Future», *Astrophysical Journal* 418 (1993), p. 457.
Sartre, Jean-Paul, *The Wall and Other Stories*, trad. Lloyd Alexander, New Directions Publishing, Nueva York, 1975, p. 12 [hay trad. cast.: *El muro*, Alianza, Madrid, 1988].
Scarpelli, Serena, Chiara Bartolacci, Aurora D'Atri *et al.*, «The Functional Role of Dreaming in Emotional Processes», *Frontiers in Psychology* 10 (marzo de 2019), p. 459.
Scheffler, Samuel, *Death and the Afterlife*, Oxford University Press, Nueva York, 2016.
Schmidt, B. P. *et al.*, «The High-Z Supernova Search: Measuring Cosmic Deceleration and Global Curvature of the Universe Using Type IA Supernovae», *Astrophysical Journal* 507 (1998), p. 46.
Schrödinger, Erwin, *What Is Life?*, Cambridge University Press, Cambridge, 2012 [hay trad. cast.: *¿Qué es la vida?*, Tusquets, Barcelona, 1984].
Schroder, Klaus-Peter, y Robert C. Smith, «Distant future of the Sun and Earth revisited», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 386, n.º 1 (2008), pp. 155-163.
Schvaneveldt, R. W., D. E. Meyer y C. A. Becker. «Lexical ambiguity, semantic context, and visual word recognition», *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 2, n.º 2 (1976), pp. 243-256.

Schwartz, Joel S., «Darwin, Wallace, and the Descent of Man», *Journal of the History of Biology* 17, n.º 2 (1984), pp. 271-289.

Shakespeare, William, *Measure for Measure*, ed. J. M. Nosworthy, Penguin Books, Londres, 1995, p. 84 [hay trad. cast.: *Medida por medida*, Planeta DeAgostini, Barcelona, 2000].

Shaw, George Bernard, *Back to Methuselah*, Create Space Independent Publishing Platform, Scotts Valley, CA, 2012.

Sheff, David, «Keith Haring, An Intimate Conversation», *Rolling Stone* 589 (agosto de 1989), p. 47.

Shermer, Michael, *The Believing Brain: From Ghosts and Gods to Politics and Conspiracies*, St. Martin's Griffin, Nueva York, 2011.

Silver, David, Thomas Hubert, Julian Schrittwieser *et al.*, «A general reinforcement learning algorithm that masters chess, shogi, and Go through self-play», *Science* 362 (2018), pp. 1140-1144.

Smuts, Aaron, «Immortality and Significance», *Philosophy and Literature* 35, n.º 1 (2011), pp. 134-149.

Solomon, Sheldon, Jeff Greenberg y Tom Pyszczynski, «Tales from the Crypt: On the Role of Death in Life», *Zygon* 33, n.º 1 (1998), pp. 9-43.

—, *The Worm at the Core: On the Role of Death in Life*, Random House Publishing Group, Nueva York, 2015.

Sosis, R., «Religion and intra-group cooperation: Preliminary results of a comparative analysis of utopian communities», *Cross-Cultural Research* 34 (2000), pp. 70-87.

Sosis, R., y C. Alcorta, «Signaling, solidarity, and the sacred: The evolution of religious behavior», *Evolutionary Anthropology* 12 (2003), pp. 264-274.

Spengler, Oswald, *Decline of the West*, Alfred A. Knopf, Nueva York, 1986 [hay trad. cast.: *La decadencia de Occidente*, Espasa, Barcelona, 2011].

Sperber, Dan, *Explaining Culture: A Naturalistic Approach*, Blackwell Publishers Ltd., Oxford, 1996 [hay trad. cast.: *Explicar la cultura: un enfoque naturalista*, Morata, Madrid, 2005].

−−−, *Rethinking Symbolism*, Cambridge University Press, Cambridge, 1975 [hay trad. cast.: *El simbolismo en general*, Anthropos, Barcelona, 1988].

Stapledon, Olaf, *Star Maker*, Dover Publications, Mineola, NY, 2008.

Steinhardt, Paul J., y Neil Turok, «The cyclic model simplified», *New Astronomy Reviews* 49 (2005), pp. 43-57.

Sterelny, Kim, *The Evolved Apprentice: How Evolution Made Humans Unique*, MIT Press, Cambridge, MA, 2012.

Stroud, Barry, «The Charm of Naturalism», *Proceedings and Addresses of the American Philosophical Association* 70, n.º 2 (noviembre de 1996),

pp. 43-55.
Stulp, G., Louise Barrett, Felix C. Tropf y Melinda Mill, «Does natural selection favour taller stature among the tallest people on earth?», *Proceedings of the Royal Society B* 282, n.º 1806 (7 de mayo de 2015), 20150211.
Susskind, Leonard, *The Black Hole War: My Battle with Stephen Hawking to Make the World Safe for Quantum Mechanic* s, Little, Brown and Co., Nueva York, 2008 [hay trad. cast.: *La guerra de los agujeros negros: una controversia científica sobre las leyes últimas de la naturaleza*, Crítica, Barcelona, 2009].
Swift, Jonathan, *Gulliver's Travels*, W. W. Norton, Nueva York, 1997 [hay. trad. cast.: *Los viajes de Gulliver*, Anaya, Madrid, 1989].
Szent-Györgyi, Albert, «Biology and Pathology of Water», *Perspectives in Biology and Medicine* 14, n.º 2 (1971), p. 239.
't Hooft, G., «Computation of the quantum effects due to a four-dimensional pseudoparticle», *Physical Review D* 14 (1976), p. 3432.
Thoreau, Henry David, *The Journal 1837-1861*, New York Review Books Classics, Nueva York, 2009, p. 563 [hay trad. cast.: *Diarios: breve antología*, Olañeta, Palma de Mallorca, 2002].
Time 41, n.º 14 (5 de abril de 1943), p. 42.
Tolman, Richard C., «On the problem of the entropy of the universe as a whole», *Physical Review* 37 (1931), pp. 1639-1660.
—, «On the theoretical requirements for a periodic behavior of the universe», *Physical Review* 38 (1931), pp. 1758-1771.
Tomasello, Michael, «Universal Grammar Is Dead», *Behavioral and Brain Sciences* 32, n.º 5 (octubre de 2009), pp. 470-471.
Tononi, Giulio, *Phi: A Voyage from the Brain to the Soul*, Pantheon, Nueva York, 2012.
Tooby, John y Leda Cosmides, «Does Beauty Build Adapted Minds? Toward an Evolutionary Theory of Aesthetics, Fiction and the Arts», *SubStance* 30 (1-2), n.º 94-95 (2001), pp. 6-27.
—, «The Psychological Foundations of Culture», en Jerome H. Barkow, Leda Cosmides y John Toobyn (eds.), *The Adapted Mind: Evolutionary Psychology and the Generation of Culture*, Oxford University Press, Oxford, 1992, pp. 19-136
Tremlin, Todd, *Minds and Gods: The Cognitive Foundations of Religion*, Oxford University Press, Oxford, 2006.
Trinkaus, Erik, Alexandra Buzhilova, Maria Mednikova y Maria Dobrovolskaya, *The People of Sunghir: Burials, Bodies and Behavior in the Earlier Upper Paleolithic*, Oxford University Press, Nueva York, 2014.

Trivers, Robert, «Parental Investment and Sexual Selection», en Bernard G. Campbell (ed.), *Sexual Selection and the Descent of Man: The Darwinian Pivot*, Aldine Publishing Company, Chicago, 1972, pp. 136-179.

Tylor, Edward Burnett, *Primitive Culture*, vol. 2, John Murray, Londres, 1873; reimpreso por Dover, 2016 [hay trad. cast.: *Cultura primitiva*, Ayuso, Madrid, 1977].

Ucko, Peter J., y Andrée Rosenfeld, *Paleolithic Cave Art*, McGraw-Hill, Nueva York, 1967.

Valley, John W., William H. Peck, Elizabeth M. King y Simon A. Wilde, «A Cool Early Earth», *Geology* 30 (2002), pp. 351-354.

Vilenkin, A., «Predictions from Quantum Cosmology», *Physical Review Letters* 74 (1995), p. 846.

Vilenkin, Alex, *Many Worlds in One*, Hill and Wang, Nueva York, 2006 [hay trad. cast.: *Muchos mundos en uno: la búsqueda de otros universos*, Alba, Barcelona, 2009].

Wagoner, R. V., «Test for the existence of gravitational radiation», *Astrophysical Journal* 196 (1975), L63.

Wallace, Alfred Russel, *Natural Selection and Tropical Nature*, Macmillan and Co., Londres, 1891.

—, «Sir Charles Lyell on geological climates and the origin of species», *Quarterly Review* 126 (1869), pp. 359-394.

Watson, J. D., y F. H. C. Crick, «Molecular Structure of Nucleic Acids: A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid», *Nature* 171 (1953), pp. 737-738.

Webb, Taylor, y Michael Graziano, «The attention schema theory: A mechanistic account of subjective awareness», *Frontiers in Psychology* 6 (2015), p. 500.

Wertheimer, Max, *Productive Thinking* (ed. ampliada), Harper and Brothers, Nueva York, 1959 [hay trad. cast.: *El pensamiento productivo*, Paidós, Barcelona, 1991].

Wheeler, John Archibald, y Wojciech Zurek, *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, Princeton, 1983, p. 220.

Whitehead, Alfred North, *Science and the Modern World*, Free Press, Nueva York, 1953, p. 10.

Wigner, Eugene, *Symmetries and Reflections*, MIT Press, Cambridge, MA, 1970.

Wilkins, Maurice, *The Third Man of the Double Helix*, Oxford University Press, Oxford, 2003.

Williams, Bernard, *Problems of the Self*, Cambridge University Press, Cambridge, 1973.

Williams, Tennessee, *Cat on a Hot Tin Roof*, New American Library, Nueva York, 1955 [hay trad. cast.: *Una gata sobre un tejado de zinc; Un análisis perfecto hecho por un loro*, Alba, Barcelona, 2007].

Wilson, David Sloan, *Darwin's Cathedral: Evolution, Religion and the Nature of Society*, University of Chicago Press, Chicago, 2002.

—, *Does Altruism Exist? Culture, Genes and the Welfare of Others*, Yale University Press, New Haven, 2015.

Wilson, E. O., *Sociobiology: The New Synthesis*, Harvard University Press, Cambridge, MA, 1975 [hay trad. cast.: *Sociobiología*, Omega, Barcelona, 1980].

Wilson, K. G., «Critical phenomena in 3.99 dimensions», *Physica* 73 (1974), p. 119.

Wittgenstein, Ludwig, *Tractatus Logico-Philosophicus*, Harcourt, Brace & Company, Nueva York, 1922 [hay trad. cast.: *Tratatus lógico-philosophicus*, Alianza, Madrid, 1997].

Witzel, Michael, *The Origins of the World's Mythologies*, Oxford University Press, Nueva York, 2012, p. 79.

Woosley, S. E., A. Heger y T. A. Weaver, «The evolution and explosion of massive stars», *Reviews of Modern Physics* 74 (2002), p. 1015.

Wrangha, Richard, *Catching Fire: How Cooking Made Us Human*, Basic Books, Nueva York, 2009.

Yeats, W. B., *Collected Poems*, Macmillan Collector's Library Books, Nueva York, 2016 [hay trad. cast.: *Poesía reunida*, Pre-Textos, Valencia, 2010].

Yourcenar, Marguerite, *Oriental Tales*, Farrar, Straus and Giroux, Nueva York, 1985 [hay trad. cast.: *Cuentos orientales*, Alfaguara, Barcelona, 1991].

Zahavi, Amotz, «Mate selection-A selection for a handicap», *Journal of Theoretical Biology* 53, n.º 1 (1975), pp. 205-214.

Zuckerman, M., «Sensation seeking: A comparative approach to a human trait», *Behavioral and Brain Sciences* 7 (1984), pp. 413-471.

Zunshine, Lisa, *Why We Read Fiction: Theory of Mind and the Novel*, Ohio State University Press, Columbus, 2006.



BRIAN GREENE (9 de febrero de 1963, Nueva York) es un físico estadounidense y uno de los mayores defensores de la teoría de cuerdas.

Brian Greene es profesor en la Universidad de Columbia desde el año 1996. Greene fue un prodigio de las matemáticas. A la temprana edad de 5 años ya era capaz de multiplicar cifras de 30 dígitos. Su nivel en matemáticas era tan alto, que a los 12 años recibió clases de un profesor de la Universidad Columbia, ya que había sobrepasado con creces el nivel de matemáticas del instituto. Sin embargo, en su trabajo posterior ha explicado las dificultades que como físico ha tenido para comprender los trabajos matemáticos de Victor Batyrev que desarrolló un planteamiento matemático convencional y riguroso de aspectos previamente descubiertos por Greene. Así mismo, Greene explica que en el curso de su investigación sobre las transiciones blandas junto con David Morrison, un matemático de la Duke University, necesitó horas diarias de instrucción por parte de Morrison para comprender algunos de los aspectos matemáticos más complicados. Greene señala que a ese respecto existe una muy diferente cultura de trabajo en los métodos de físicos y matemáticos, que pueden hacer sus trabajos mutuamente incomprensibles en alto grado.

En 1980, Brian Greene entró en Harvard para estudiar física, y tras licenciarse, fue a la universidad de Oxford en Inglaterra, como Becario Rhodes.

Greene es el autor del conocido libro *El universo elegante* en el cual habla del desarrollo de la física del siglo XX repasando desde la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica hasta llegar a introducir los últimos desarrollos sobre la teoría de las cuerdas, que constituye el núcleo del libro.

Notas

[1] La cita es de uno de mis primeros mentores, Neil Bellinson, un estudiante de doctorado del Departamento de Matemáticas de la Universidad de Columbia en la década de 1970, quien brindó su tiempo y su especial talento para enseñar matemáticas a un joven estudiante (yo mismo) que no podía ofrecer a cambio más que su pasión por aprender. Discutíamos a la sazón un ensayo sobre la motivación humana que yo estaba escribiendo para un curso de psicología de Harvard que impartía David Buss, hoy en la Universidad de Texas. <<

[2] Oswald Spengler, *Decline of the West*, Alfred A. Knopf, Nueva York, 1986, p. 7 [hay trad. cast.: *La decadencia de Occidente*, Espasa, Barcelona, 2011]. <<

[3] *Ibid*, p. 166. <<

[4] Otto Rank, *Art and Artist: Creative Urge and Personality Development,* trad. Charles Francis Atkinson, Alfred A. Knopf, Nueva York, 1932, p. 39. <<

[5] Sartre articula esta perspectiva a través de las reflexiones del personaje condenado Pablo Ibbieta en su magnífico cuento *El muro*, Jean-Paul Sartre, *The Wall and Other Stories*, trad. Lloyd Alexander, New Directions Publishing, Nueva York, 1975, p. 12 [hay trad. cast.: *El muro*, Alianza, Madrid, 1988]. <<

[1] William James, *The Varieties of Religious Experience: A Study in Human Nature*, Longmans, Nueva York, Green and Co., 1905, p. 140 [hay trad. cast.: *Las variedades de la experiencia religiosa: estudio de la naturaleza humana*, Península, Barcelona, 2002]. <<

[2] Steven Wright (n. 1955) es un popular cómico, monologuista y actor estadounidense. (*N. del t.*) **<<**

[3] Ernest Becker, *The Denial of Death*, Free Press, 1973, p. 31 [hay trad. cast.: *La negación de la muerte*, Kairós, Barcelona, 2003]. Becker reconoce en Otto Rank su principal influencia. <<

[4] Ralph Waldo Emerson, *The Conduct of Life*, Houghton Mifflin Company, Boston y Nueva York, 1922, nota 38, p. 424 [hay trad. cast.: *La conducta de la vida*, Pre-Textos, Valencia, 2004]. <<

[5] E. O. Wilson recupera la palabra «consiliencia» para describir su concepción del acercamiento y unión de conocimientos dispares para conseguir un entendimiento más profundo. E. O. Wilson, *Consilience: The Unity of Knowledge*, Vintage Books, Nueva York, 1999 [hay trad. cast.: *Consilience: la unidad del conocimiento*, Galaxia Gutenberg, Barcelona, 1999]. <<

[6] En capítulos posteriores discutiré los indicios que llevan a pensar que la conciencia de la propia mortalidad ha tenido una influencia generalizada en la humanidad, pero como hay pocos datos, o ninguno, que den fe del marco mental de los antiguos humanos, la conclusión no es universalmente aceptada. Para una perspectiva alternativa, que sostiene que la ansiedad ante la muerte es una aflicción moderna, véase, por ejemplo, Philippe Ariès, *The Hour of Our Death*, trad. Helen Weaveer, Alfred A. Knopf, 1981 [hay trad. cast.: *El hombre ante la muerte*, Taurus, Barcelona, 1987]. La perspectiva de Becker, que se construye sobre las ideas de Otto Rank, es que la ansiedad ante la muerte es consustancial a nuestra especie. <<

[7] Vladimir Nabokov, *Speak, Memory: An Autobiography Revisited*, Alfred A. Knopf, Nueva York, 1999, p. 9 [hay trad. cast.: *Habla, memoria: una autobiografía revisitada*, Anagrama, Barcelona, 1988]. <<

[8] Robert Nozick, «Philosophy and the Meaning of Life», en David Benatar (ed.), *Life, Death, and Meaning: Key Philosophical Readings on the Big Questions*, The Rowman & Littlefield Publishing Group, Lanham, MD, 2010, pp. 73-74. <<

[9] Emily Dickinson, *The Poems of Emily Dickinson. Reading edition,* edición de R. W. Franklin, The Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge, MA, 1999, p. 307 [hay trad. cast.: *Poemas*, Visor, Madrid, 1986]. <<

[10] Henry David Thoreau, *The Journal, 1837-1861*, New York Review Books Classics, Nueva York, 2009, p. 563 [hay trad. cast.: *Diarios: breve antología*, Olañeta, Palma de Mallorca, 2002]. <<

[11] Franz Kafka, *The Blue Octavo Notebooks*, traducción de Ernst Kaiser y Eithne Wilkens, edición de Max Brod, Exact Change, Cambridge, MA, 1991, p. 91 [hay trad. cast.: *Cuadernos en octavo*, Alianza, Madrid, 2018]. <<

[1] La emisión, en el *Third Programme* de la BBC, el 28 de enero de 1948 a las 9.45, correspondía a un debate que había tenido lugar el año anterior: <https://genome.ch.bbc.co.uk/35b8e9bdcf60458c976b882d80d9937f> [hay transcripción traducida al castellano: Russell, B. y F. C. Copleston, *Debate sobre la existencia de Dios*, Publicacions de la Universitat de València, Valencia, 1978]. **<<**

[2] Bertrand Russell, *Why I Am Not a Christian*, Simon & Schuster, 1957, pp. 32-33 [hay trad. cast.: *Por qué no soy cristiano*, EDHASA, Barcelona, 1983]. <<

[3] Esta es, naturalmente, una descripción muy simplificada de una máquina de vapor, modelada a partir de lo que se conoce como ciclo de Carnot, que consiste en cuatro pasos: (1) El vapor contenido en un cilindro absorbe calor de una fuente (que suele describirse como una reserva de calor) al tiempo que empuja contra un pistón, realizando trabajo a temperatura constante. (2) El cilindro es desconectado de la fuente de calor mientras se le permite que siga empujando el pistón, de modo que ahora realiza trabajo mientras la temperatura desciende (pero su entropía es constante, puesto que no hay flujo de calor). (3) El cilindro se conecta entonces a una segunda reserva de calor, a una temperatura menor que la anterior, y se realiza trabajo a esta temperatura menor pero constante para deslizar el pistón de vuelta a su posición original, expeliendo calor residual durante el proceso. (4) Por último, el cilindro se desconecta de la reserva más fría mientras continúa realizando trabajo sobre el pistón, que completa así su regreso a la posición original al tiempo que la temperatura del vapor retorna también a su valor original. Entonces el ciclo comienza de nuevo. En una máquina de vapor real (en contraste con la teórica que analizamos matemáticamente) estos pasos, u otros comparables, se realizan de maneras muy distintas en función de consideraciones prácticas o de ingeniería. <<

[4] Sadi Carnot, *Reflections on the Motive Power of Fire*, Dover Publications, Inc., Mineola, NY, 1960 [hay trad. cast.: *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas adecuadas para desarrollar esta potencia y otras notas de carácter científico*, Alianza, Madrid, 1987]. <<

[5] Modelar una pelota de béisbol como una sola partícula de masa, sin estructura interna, es una aproximación burda de la propia pelota. Sin embargo, la aplicación de las leyes de Newton a ese modelo aproximado de la pelota nos da el movimiento clásico exacto del centro de masas de la pelota de béisbol. Para el movimiento del centro de masas, la tercera ley de Newton garantiza que todas las fuerzas internas se compensan, de manera que el movimiento del centro de masas depende únicamente de las fuerzas externas aplicadas. <<

[6] Un estudio (B. Hansen, N. Mygind, «How often do normal persons sneeze and blow the nose?», *Rhinology*, 40, n.º 1, marzo de 2002, pp. 10-12) llegó a la conclusión de que una persona estornuda, por término medio, una vez al día. Como hay unos siete mil millones de personas en el mundo, se producen unos siete mil millones de estornudos al día, y como en un día hay unos ochenta y seis mil segundos, obtenemos unos ochenta mil estornudos por segundo en todo el mundo. <<

[7] La descripción que he presentado está bien como resumen simplificado, pero hay sistemas físicos más extraños en los que para asegurar que las secuencias inversas están permitidas por las leyes de la física es necesario someter el sistema a otras dos manipulaciones además de la inversión del tiempo: debemos invertir también las cargas de las partículas («conjugación de carga») y, asimismo, la quiralidad izquierda y derecha («inversión de paridad»). Las leyes de la física, tal como las entendemos en la actualidad, respetan necesariamente la conjunción de estas tres inversiones, lo que suele conocerse como «teorema CPT» (C por la conjugación de carga, P por la inversión de paridad y T por la inversión del tiempo). <<

[8] Para dos cruces, el cálculo es $(100 \times 99)/2 = 4950$; para tres cruces, $(100 \times 99 \times 98)/3! = 161\,700$; para cuatro cruces, $(100 \times 99 \times 98 \times 97)/4! = 3\,921\,225$; para cinco cruces, $(100 \times 99 \times 98 \times 97 \times 96)/5! = 75\,287\,520$; para cincuenta cruces $(100!/(50!)^2) = 100\,891\,344\,545\,564\,193\,334\,812\,497\,256$. <<

[9] En términos más precisos, la entropía es el logaritmo del número de miembros de un grupo dado, una distinción matemática esencial que garantiza que la entropía posea propiedades físicas razonables (por ejemplo, que cuando se unen dos sistemas, sus entropías se sumen), pero que para nuestra discusión cualitativa podemos ignorar sin perjuicio. En algunas partes del capítulo 10 utilizaremos de manera implícita la definición más precisa, pero por el momento no hace falta. <<

[10] Por razones didácticas, en este ejemplo consideraremos únicamente el vapor de agua (moléculas de H_2O) que flota en la habitación. Ignoraremos el papel del aire y de cualquier otra sustancia que esté presente. Por simplicidad, pasaremos por alto también la estructura interna de las moléculas de agua y las trataremos como si fueran partículas sin estructura. Cuando nos referimos a la temperatura del vapor, hay que recordar que el agua líquida pasa a vapor a 100 ºC, pero una vez formado este, su temperatura puede aumentar todavía más. <<

[11] Físicamente, la temperatura es proporcional a la energía cinética media de las partículas, de modo que matemáticamente se calcula como el promedio del cuadrado de la velocidad de cada partícula. Para lo que nos ocupa, es adecuado pensar en la temperatura en términos de la velocidad media (la magnitud de la velocidad). <<

[12] En términos más precisos, la primera ley de la termodinámica es una versión de la ley de la conservación de la energía que (I) reconoce el calor como una forma de energía y (II) toma en cuenta el trabajo realizado por o sobre un sistema dado. Así pues, la conservación de la energía establece que el cambio en la energía interna de un sistema surge de la diferencia entre el calor neto que absorbe y el trabajo neto que realiza. Los lectores mejor informados pueden objetar que cuando se considera la energía y su conservación a una escala global (en todo el universo), aparecen algunas sutilezas, pero no necesitaremos explorarlas, de modo que podemos suponer sin problemas que el enunciado de que la energía se conserva es cierto. <<

[13] Como en el ejemplo del vapor de agua en el baño, en el cual ignoramos las moléculas de aire, por simplicidad no considero aquí de manera explícita las colisiones entre las moléculas calientes liberadas por la cocción del pan y las moléculas de aire, más frías, que flotan por la cocina y el resto de la casa. Por término medio, esas colisiones incrementarían la velocidad de las moléculas de aire y reducirían la de las moléculas que emanan de la cocción del pan para, finalmente, llevar a los dos tipos de moléculas a la misma temperatura. La menor temperatura de las moléculas de aire las llevaría a reducir su entropía, mientras que la mayor temperatura de las moléculas de aire produciría un incremento todavía mayor en esta, de manera que la entropía combinada de los dos grupos aumentaría. En la versión simplificada que describo, se puede imaginar que la velocidad media de las moléculas que emanan de la cocción del pan se mantiene constante a medida que se dispersan; de esta forma, su temperatura se mantendría fija, de modo que el aumento de su entropía habría que atribuirlo a que pasan a ocupar un volumen mayor. <<

[14] El lector avezado en matemáticas debe saber que esta discusión se sustenta en una suposición técnica clave (como en la mayoría de los tratamientos de mecánica estadística en libros de texto o en la literatura científica). Dado un macroestado determinado, existen microestados compatibles que evolucionarán hacia configuraciones de baja entropía. Pensemos, por ejemplo, en la versión invertida en el tiempo de cualquier proceso que genere cierto microestado a partir de una configuración anterior de menor entropía. Ese microestado «invertido en el tiempo» evolucionaría hacia una menor entropía. En general, categorizamos esos microestados como «raros», o «muy afinados». Matemáticamente, una categorización así requiere que especifiquemos una medida en el espacio de configuraciones. En situaciones familiares, el uso de la medida uniforme en ese espacio hace que las condiciones iniciales que llevan a una reducción de entropía sean efectivamente «raras», es decir, de medida pequeña. Sin embargo, si se escoge una medida que arroje valores altos alrededor de esas configuraciones iniciales que llevan a una reducción de entropía, estas, por diseño, no serían raras. Por lo que sabemos, la elección de la medida es empírica; para los tipos de sistemas con los que nos encontramos en la vida cotidiana, la medida uniforme produce predicciones que concuerdan con las observaciones, de modo que esa es la que adoptamos. Pero es importante observar que la elección de medida queda justificada por experimentos y observaciones. Cuando consideramos situaciones más exóticas (con el universo primigenio) para las cuales carecemos de datos análogos que nos conduzcan a una elección particular de medida, tenemos que reconocer que nuestras intuiciones sobre «raro» o «genérico» no se sustentan en la misma base empírica. <<

[15] Hay varias cuestiones relevantes por las que hemos pasado de puntillas en este párrafo, pero que afectan al significado de un estado de «máxima entropía» cuando se aplica al universo. En primer lugar, en este capítulo no tenemos en cuenta el papel de la gravedad. Lo haremos en el capítulo 3. Veremos entonces que la gravedad tiene un enorme impacto sobre la naturaleza de las configuraciones de partículas de alta entropía. De hecho, aunque no vaya a ser nuestro interés principal, en un volumen finito de espacio la configuración de máxima entropía es un agujero negro, un objeto profundamente dependiente de la gravedad que llena por completo el volumen espacial (pueden encontrarse los detalles, por ejemplo, en mi libro *El tejido del cosmos*, capítulos 6 y 16). En segundo lugar, si consideramos regiones del espacio arbitrariamente grandes (incluso infinitamente grandes), las configuraciones de mayor entropía de una cantidad dada de materia y energía son aquellas en las que las partículas constituyentes (materia y/o radiación) se encuentran distribuidas de manera uniforme por un volumen cada vez mayor. De hecho, los agujeros negros, como discutiremos en el capítulo 10, acaban por evaporarse (mediante un proceso descubierto por Stephen Hawking), produciendo configuraciones de mayor entropía en las que las partículas están cada vez más esparcidas. En tercer lugar, para el propósito de esta sección el único hecho que necesitamos es que la entropía actualmente presente en un volumen de espacio cualquiera no se encuentra en su valor máximo. Si ese volumen contuviera, pongamos por caso, la habitación en la que estamos, la entropía aumentaría si todas las partículas que nos componen a nosotros y a nuestros muebles y a cualquier otra estructura material de la estancia se colapsarían en un agujero negro, que, con posterioridad, se evaporaría produciendo partículas que se esparcirían por un volumen aún mayor del espacio. La propia existencia de estructuras materiales interesantes (estrellas, planetas, vida y demás) implica, por tanto, que la entropía es menor de lo que en potencia podría ser. Son esas configuraciones especiales, de entropía comparativamente reducida, las que requieren una explicación sobre su origen. Ese es el reto que encararemos en el próximo capítulo. <<

[16] Para el lector más diligente, queda por explicar un último detalle. Cuando el vapor empuja el pistón, gasta una parte de la energía absorbida por el combustible, pero durante el proceso no cede nada de su entropía al pistón (suponiendo que este tenga la misma temperatura que el vapor). Al fin y al cabo, que el pistón se encuentre «aquí» o, tras ser empujado, a cierta distancia de «aquí» no afecta para nada a su orden o desorden interno; su entropía no cambia. Y si no se transfiere entropía al pistón, toda ella debe quedar en el propio vapor. Esto significa que cuando el pistón retorna a su posición original, preparado para el siguiente empujón, el vapor debe expeler de algún modo todo el exceso de entropía que alberga. Como se subraya en el capítulo, esto lo consigue expulsando el calor del vapor hacia el entorno. <<

[17] Bertrand Russell, *Why I Am Not a Christian*, Simon & Schuster, 1957, p. 107 [hay trad. cast.: *Por qué no soy cristiano*, EDHASA, Barcelona, 1983]. <<

[1] Georges Lemaître, «Rencontres avec Einstein», *Revue des questions scientifiques*, 129 (1958), pp. 129-132. <<

[2] En la historia completa de la conversión de Einstein a un universo en expansión intervienen dos factores. En primer lugar, Arthur Eddington demostró matemáticamente que la anterior propuesta de Einstein de un universo estático adolecía de un problema técnico: la solución era inestable, es decir, si la gran expansión del universo era empujada levemente a expandirse, seguía haciéndolo, y si era empujada levemente a contraerse, seguía contrayéndose. En segundo lugar, las observaciones, como se comenta en este capítulo, dejaron cada vez más claro que el universo no era estático. La combinación de ambos factores convenció a Einstein de que debía desechar la idea de un universo estático (aunque, a decir de algunos, las consideraciones teóricas tuvieron más peso). Para conocer más detalles de esta historia, véase Harry Nussbaumer, «Einstein's conversion from his static to an expanding universe», *European Physics Journal-History*, 39 (2014), pp. 37-62. <<

[3] Alan H. Guth, «Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems», *Physical Review*, D 23 (1981), p. 347. El término técnico para el «combustible fósil» es un campo «escalar». A diferencia de los campos eléctrico y magnético, más familiares, que sitúan en cada punto del espacio un vector que nos da la magnitud y la dirección de campo eléctrico o magnético en ese lugar, un campo escalar nos da un solo número para cada punto del espacio (y a partir de estos números se puede determinar la energía y la presión del campo). Nótese que el artículo de Guth y muchos otros tratamientos posteriores ponen el énfasis en el papel de la inflación para abordar una serie de cuestiones cosmológicas que previamente se habían alzado como obstáculos para los investigadores, entre los que destacan el problema del monopolo, el problema del horizonte y el problema de la planitud. Para una discusión accesible e iluminadora sobre estas cuestiones, véase Alan Guth, *The Inflationary Universe*, Basic Books, Nueva York, 1998 [hay trad. cast.: *El universo inflacionario*, Debate, Barcelona, 1999]. Siguiendo a Guth, pretendo motivar la inflación planteando primero el problema más intuitivo de identificar el empuje hacia fuera que impulsó la expansión espacial del Big Bang. <<

[4] El enfriamiento al que me refiero se produce después de concluido el estallido inflacionario, cuando el universo ha entrado en una fase de expansión espacial menos rápida, aunque todavía significativa. En bien de la simplicidad, he omitido algunos pasos intermedios de la evolución cosmológica. El universo primigenio se enfrió porque una gran parte de la energía que contenía iba a caballo de ondas electromagnéticas, y esas ondas se estiran a medida que el espacio se expande. Esta elongación de las ondas electromagnéticas, responsable del corrimiento al rojo de la radiación, reduce tanto su energía como su temperatura global. Nótese, no obstante, que aunque la temperatura disminuye, la entropía global aumenta a causa de la expansión del volumen de espacio. <<

[5] Hay una perspectiva minoritaria que atribuye este empañamiento a una limitación cuántica inherente a la precisión de las mediciones más que a una realidad fundamentalmente borrosa. En este enfoque, que suele conocerse como «mecánica bohmiana», por el físico David Bohm, pero a veces como «teoría de De Broglie-Bohm», atribuyéndola también al premio Nobel de Física Louis de Broglie, las partículas retienen trayectorias bien definidas. Estas son distintas de las que predice la física clásica (hay una fuerza cuántica adicional que actúa sobre las partículas cuando se mueven), pero, por usar el lenguaje del capítulo, podrían trazarse con una pluma fina. La incertidumbre y borrosidad de la formulación más tradicional de la mecánica cuántica se manifiesta como incertidumbre estadística sobre las condiciones iniciales de una partícula determinada. La diferencia entre las dos perspectivas, aunque esencial para la imagen de la realidad que cada una de ellas pinta, no tiene mayor impacto sobre las predicciones cuantitativas. <<

[6] La cosmología inflacionaria es (en contraposición a una teoría específica) un marco de teorías basadas en la premisa de que durante una fase temprana de su desarrollo, el universo experimentó un breve período de expansión rápida y acelerada. La forma precisa en que surgió esta fase y los detalles precisos de cómo se desplegó varían de una formulación matemática a otra. Las versiones más simples se encuentran en comflicto con datos observacionales cada vez más precisos, lo cual ha llevado a poner más atención a versiones un tanto más complejas de la teoría inflacionaria. Los detractores argumentan que las versiones más complejas son menos convincentes y que, además, demuestran que el paradigma inflacionario es demasiado flexible para que los datos puedan refutarla. Quienes la defienden responden que solo estamos presenciando el progreso natural de la ciencia: de manera continuada ajustamos nuestras teorías para que concuerden con la información más precisa que proveen las mediciones observacionales y las indagaciones matemáticas. En términos más generales, pero también más técnicos, una aserción ampliamente aceptada por los físicos es que el universo experimentó una fase durante la cual disminuyó el tamaño del horizonte comóvil. Lo que no está tan claro es que esa fase quede correctamente descrita por la teoría inflacionaria, en la cual la dinámica responde a la energía uniforme que llena el espacio y que provee un campo escalar (véase la nota 3 de este capítulo), tal como he descrito, o si, por el contrario, podría haber surgido por un mecanismo distinto (cosmologías del rebote, inflación de brana, mundos de brana en colisión, teorías de la velocidad de la luz variable y otras que los físicos han propuesto). En el capítulo 10 comentaremos brevemente la posibilidad de una cosmología del rebote desarrollada por Paul Steinhardt, Neil Turok y varios colaboradores, en la que el universo experimenta numerosos ciclos de evolución cosmológica. <<

[7] Para satisfacer al lector especialmente inquieto, debo abordar una cuestión importante que ensombrece la discusión. Si todo lo que sabemos de un sistema físico es que tiene una entropía menor que la máxima disponible, la segunda ley de la termodinámica nos permite extraer no una, sino dos conclusiones: la evolución más probable del sistema hacia el futuro incrementará su entropía y la evolución más probable del sistema hacia el pasado también incrementará su entropía. Tal es la carga a la que nos someten las leyes simétricas en el tiempo, es decir, ecuaciones que operan exactamente del mismo modo tanto si el sistema actual evoluciona hacia el futuro como si evoluciona hacia el pasado. El reto es que el pasado de mayor entropía al que nos conducen estas consideraciones es incompatible con el pasado de menor entropía que atestiguan la memoria y los recuerdos. (Recordamos que unos cubitos de hielo parcialmente derretidos antes habían estado menos derretidos, y por lo tanto con menor entropía, y no más derretidos, lo que correspondería a mayor entropía.) Más aún, un pasado de alta entropía socavaría nuestra confianza en las propias leyes de la física porque ese pasado no incluiría los experimentos y observaciones que respaldan las propias leyes. Para evitar esta pérdida de confianza en nuestro conocimiento tenemos que «forzar» un pasado de baja entropía. Por lo general, eso lo conseguimos introduciendo una nueva suposición, que el filósofo David Albert denomina «hipótesis del pasado», que declara que la entropía está anclada en un valor bajo cerca del Big Bang y que, por término medio, no ha dejado de aumentar desde entonces. Este es el enfoque que, de manera implícita, hemos adoptado en este capítulo. En el capítulo 10 analizaremos de manera explícita la posibilidad improbable, pero concebible, de que emerja un estado de baja entropía a partir de una configuración anterior de alta entropía. Para información de base y más detalles, véase el capítulo 7 de *El tejido del cosmos*. <<

[8] Las descripciones matemáticas de la entropía lo expresan de forma precisa: dentro de una región, hay muchas más maneras de que el valor de un campo varíe (más alto aquí, más bajo allá, mucho más bajo acullá) que maneras de que sea uniforme (el mismo valor en todos los puntos), de modo que las condiciones requeridas tienen baja entropía. No obstante, hay oculta una suposición técnica que es importante sacar a la luz. Por facilitar la comprensión, usaré el lenguaje de la física clásica, pero las consideraciones tienen una traducción directa a la física cuántica. En el micromundo, no hay ninguna configuración de partículas o campos que quede señalada como fundamentalmente especial, de modo que de manera general se las considera a todas de igual modo probables. Pero esta es una suposición que reposa sobre lo que los filósofos conocen como «principio de indiferencia». A falta de evidencia *a priori* para distinguir una configuración microscópica de otra, les asignamos la misma probabilidad de ocurrir. Cuando nos fijamos en el macromundo, la probabilidad de un estado del macromundo respecto a otro queda determinada por el cociente entre el número de microestados que produce cada uno de los macroestados. Si hay el doble de microestados que producen cierto macroestado en comparación con los que dan lugar a otro, ese macroestado tendrá el doble de probabilidad de ocurrir.Nótese, sin embargo, que fundamentalmente, la justificación del principio de indiferencia debe tener una base empírica. De hecho, la experiencia común confirma la validez de una multitud de usos del principio de indiferencia, por implícitos que sean. Tomemos nuestro ejemplo de las monedas. Al suponer que cada «microestado» de las monedas (un estado que viene especificado por una lista del estado que presenta cada moneda, por ejemplo, que la moneda 1 es cara, la 2 es cruz, la 3 es cruz, etc.) es tan probable como cualquier otro, llegamos a la conclusión de que serán más probables aquellas configuraciones «macroscópicas» (estados especificados solamente como el número de caras y cruces, no el estado de cada moneda individual) que puedan ser el resultado de más microestados. Cuando tiramos las monedas, esta suposición queda empíricamente confirmada por la rareza de los resultados que solo pueden producirse a partir de un pequeño número de microestados (por ejemplo, todas cara) y la ubicuidad de los que pueden producirse a partir de un gran número de microestados (por ejemplo, la mitad cara y la mitad cruz).

La relevancia de esto para nuestra discusión cosmológica es que cuando decimos que una mancha uniforme del campo del inflatón es «improbable», estamos invocando también el principio de indiferencia. Es decir, suponemos de manera implícita que cada configuración microscópica posible del campo (el valor preciso del campo en cada punto) es tan probable como cualquier otra, de manera que, una vez más, la probabilidad de una configuración macroscópica dada es proporcional al número de microestados que la producen. Sin embargo, a diferencia del caso de las monedas, carecemos de observaciones empíricas que respalden esta suposición. Si nos parece razonable es precisamente a causa de nuestra experiencia en el macromundo macroscópico, donde el principio de indiferencia sí queda respaldado por las observaciones. En el caso de la evolución del cosmos, no tenemos más que una sola ejecución del experimento. Un enfoque empírico riguroso habría de concluir que por muy especiales que nos parezcan algunas configuraciones de acuerdo con el principio de indiferencia, si nos conducen al universo que observamos, quedan distinguidas y, como clase, merecen ser llamadas no ya «probables», sino «definidas» (aunque con sujeción a la habitual naturaleza provisional de todas las explicaciones científicas). Matemáticamente, ese cambio entre lo que llamamos probable e improbable corresponde a un cambio en la medida sobre el espacio de configuraciones (véase el capítulo 2, nota 14). La medida inicial, que asigna probabilidades iguales a todas las configuraciones posibles, se denomina medida «plana». Las observaciones pueden llevarnos entonces a introducir una medida «no plana» que distinga ciertas clases de configuraciones como más probables.

Los físicos se sienten por lo general insatisfechos con ese enfoque. Introducir una medida en el espacio de configuraciones para garantizar que el mayor peso lo reciban aquellas que conducen al mundo que conocemos es algo que a los físicos les parece «no natural». Los físicos buscan una estructura fundamental, matemática, basada en primeros principios, de la que se desprenda esa medida como resultado, no que haya que incluirla en la propia formulación. Cabe preguntarse si eso no será pedir demasiado y si conseguirlo no nos llevaría simplemente un paso más atrás hacia los presupuestos implícitos que subyacen a un enfoque basado en primeros principios. Estas no son preocupaciones menores. Buena parte de los últimos treinta años de investigación en física de partículas se ha dirigido a abordar cuestiones del ajuste fino de nuestras teorías más sofisticadas (el ajuste fino del campo de Higgs en el modelo estándar de la física de partículas, el ajuste fino requerido para abordar los problemas del horizonte y de planitud de la

cosmología del Big Bang estándar). Es verdad que esas investigaciones han llevado a una comprensión profunda tanto de la física de partículas como de la cosmología, pero ¿llegará un día en que simplemente hayamos de aceptar como dadas ciertas características del mundo, sin una explicación más profunda? Quiero pensar, como muchos de mis colegas, que la respuesta es que no. Pero nada nos asegura que no vaya a ser así. <<

[9] Andréi Linde, comunicación personal, 15 de julio de 2019. El enfoque preferido de Linde es que la fase inflacionaria se inicia a través de un evento de túnel cuántico desde un dominio de todas las geometrías y campos posibles, en el que los propios conceptos de tiempo y temperatura podrían carecer de significado. Mediante un uso juicioso de ciertos aspectos del formalismo cuántico, Linde ha argumentado que la creación cuántica de condiciones que conducen a una expansión inflacionaria podrían haber sido un proceso común en el universo primigenio, que no sufre supresión cuántica. <<

[10] Resulta natural pensar que cuanto más potente sea un telescopio (mayor el plato, mayor el tamaño del espejo, etc.), más lejos estarán los objetos que pueda llegar a resolver. Pero hay un límite. Si un objeto está tan lejos que toda la luz que ha emitido desde su nacimiento no ha tenido tiempo suficiente de alcanzarnos, entonces con independencia del equipo que usemos, no podremos verlo. Decimos de tales objetos que se encuentran más allá del «horizonte cósmico», un concepto que desempeñará un papel especialmente importante en nuestra discusión sobre el futuro lejano en los capítulos 9 y 10. En la cosmología inflacionaria, el espacio se expande tan deprisa que las regiones circundante acaban empujadas más allá de nuestro horizontes cósmico. <<

[11] Existe un amplio consenso, basado en pruebas indirectas (el movimiento de estrellas y galaxias), en que el espacio está inundado de partículas de materia oscura, partículas que ejercen una fuerza gravitatoria pero no absorben ni producen luz. Sin embargo, hasta ahora la búsqueda de estas partículas ha resultado infructuosa, lo que ha llevado a algunos investigadores a proponer alternativas a la materia oscura que explican las observaciones mediante modificaciones de la ley de la fuerza de la gravitación. Ante el continuo fracaso de numerosos experimentos dirigidos a detectar directamente partículas de materia oscura, las teorías alternativas resultan cada vez más atractivas. <<

[12] La dirección del flujo de calor de las sustancias o entornos más calientes hacia los más fríos es una consecuencia directa de la segunda ley de la termodinámica. Cuando el café caliente se enfría hasta alcanzar la temperatura ambiente, el aire se calienta ligeramente, y por lo tanto su entropía aumenta. El aumento de la entropía del aire es superior a la reducción de entropía en el café frío, de modo que la entropía global aumenta. Matemáticamente, el cambio de entropía de un sistema viene dado por el cambio enel calor dividido por la temperatura ($\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$, donde S es la entropía, Q es el calor y T es la temperatura). Cuando el calor fluye de un sistema más caliente a otro más frío, la magnitud del cambio en el calor en cada uno de los sistemas es el mismo, pero, tal como muestra la ecuación, la reducción de la entropía en el sistema más caliente será menor que el aumento de entropía en el más frío (a causa del factor T del denominador), de modo que el cambio neto producirá un aumento global de la entropía. <<

[13] Desde el punto de vista de la conservación de la energía, a medida que las moléculas se desplazan hacia fuera, su energía gravitatoria potencial aumenta, de modo que se reduce su energía cinética. <<

[14] El lector interesado en las matemáticas y formado en física podrá entender esto con un cálculo rápido con la ayuda de la mecánica estadística, que nos dice que la entropía es proporcional al volumen en el espacio de fases. Supongamos que la nube de gas que se contrae satisface el (famoso) teorema del virial, que relaciona la energía cinética promedio de las partículas, K, con su energía potencial promedio, U, a través de la ecuación $K = -U/2$. Entonces, como la energía potencial gravitatoria es proporcional a $1/R$, donde R es el radio de la nube, vemos que K es también proporcional a $1/R$. Además, como la energía cinética es proporcional al cuadrado de las velocidades de las partículas, obtenemos que la velocidad media de las partículas es proporcional a $1/\sqrt{R}$. El volumen en el espacio de fases accesible a las partículas de la nube es, por consiguiente, proporcional a $R3(1/\sqrt{R})^3$, donde el primer factor representa el volumen espacial accesible a las partículas, y el segundo, el volumen en el espacio de momentos accesible a las partículas. Como vemos, la reducción del volumen espacial predomina sobre el aumento del volumen en el espacio de momentos, de modo que se produce una reducción de la entropía a medida que la nube se contrae. Nótese además que el teorema del virial garantiza que, a medida que la nube se contrae, el descenso de energía potencial supere al aumento de energía cinética (a causa del factor de «2» en el teorema que relaciona K y U), así que en la parte de la nube que se contrae no solo se reduce la entropía, sino también la energía. Esa reducción es debida a la energía que se irradia hacia las capas exteriores, cuya energía aumenta, al igual que su entropía. <<

[1] Carta de F. H. C. Crick a E. Schrödinger, 12 de agosto de 1953. <<

[2] J. D. Watson y F. H. C. Crick, *«Molecular Structure of Nucleic Acids: A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid», Nature* 171 (1953), pp. 737-738. La figura central del descubrimiento fue la química y cristalógrafa Rosalind Franklin, cuya fotografía 51 fue proporcionada por Wilkins a Watson y Crick sin que ella tuviera conocimiento de ello. Esta fotografía fue crucial para que Watson y Crick completasen su modelo de la doble hélice del ADN. Franklin falleció en 1958, cuatro años antes de que se concediera el premio Nobel por desentrañar la estructura del ADN, y el Nobel no se puede conceder a título póstumo. De haber estado viva, no está claro cómo habría actuado el comité del Nobel. Véase, por ejemplo, Brenda Maddox, *Rosalind Franklin: The Dark Lady of DNA*, Harper Perennial, Nueva York, 2003. **<<**

[3] Maurice Wilkins, *The Third Man of the Double Helix*, Oxford University Press, Oxford, 2003, p. 84. <<

[4] Erwin Schrödinger, *What Is Life?*, Cambridge University Press, Cambridge, 2012, p. 3 [hay trad. cast.: *¿Qué es la vida?*, Tusquets, Barcelona, 1984]. <<

[5] Revista *Time*, vol. 41, n.º 14, 5 de abril de 1943, p. 42. <<

[6] Erwin Schrödinger, *What Is Life?*, Cambridge University Press, Cambridge, 2012, p. 87 [hay trad. cast.: *¿Qué es la vida?*, Tusquets, Barcelona, 1984]. <<

[7] K. G. Wilson, «Critical phenomena in 3.99 dimensions», *Physica* 73 (1974), p. 119. Para una descripción medianamente técnica con referencias, véase su conferencia de recepción del premio Nobel: <https://www.nobelprize.org>. **<<**

[8] En manifestaciones diversas, la idea de los «relatos encajados», en ocasiones descrita como «niveles de entendimiento» o «niveles de explicación», ha sido invocada por estudiosos de un amplio abanico de disciplinas. Los psicólogos hablan de explicar el comportamiento a nivel biológico (apelando a causas físico-químicas), a nivel cognitivo (apelando a las funciones cerebrales de alto nivel), y a nivel cultural (apelando a influencias sociales); algunos científicos cognitivos (empezando por el neurocientífico David Marr) reconocen para la comprensión de los sistemas de procesamiento de la información un nivel computacional, un nivel algorítmico y un nivel físico. En común a muchos de los programas jerárquicos adoptados por filósofos y físicos hay un compromiso con el «naturalismo», un término usado con frecuencia, pero que no es fácil de definir con rigor. La mayoría de quienes lo utilizan estarían de acuerdo en que el naturalismo rechaza explicaciones que apelan a entidades sobrenaturales y, no obstante, se basan en cualidades del mundo natural. Obviamente, para precisar esta posición tenemos que especificar límites discernibles de lo que constituye el mundo natural, y eso es más fácil de decir que de hacer. Las mesas y los árboles entran de lleno en su dominio, pero ¿y el número cinco o el último teorema de Fermat? ¿Y la emoción de la alegría o la sensación del rojo? ¿Y los ideales de una libertad inalienable y la dignidad humana?

Año tras año, preguntas como estas han inspirado muchas variaciones sobre el tema del naturalismo. Una posición extrema sostiene que el único conocimiento legítimo del mundo procede de los conceptos y los análisis de la ciencia, una posición que a veces se etiqueta como «cientifismo». También en este caso la perspectiva obliga a sus defensores a definir los términos con rigor: ¿qué constituye la ciencia? Claramente, si por ciencia entendemos las conclusiones basadas en observaciones, experiencia y pensamiento racional, sus límites se extienden mucho más allá de las disciplinas que solemos encontrar representadas en los departamentos universitarios. Como puede imaginarse, eso conlleva denuncias de una considerable extralimitación de la ciencia.

Otras posiciones menos extremas incorporan el compromiso con el naturalismo mediante varios principios organizativos. El filósofo Barry Stroud ha defendido lo que él llama «naturalismo expansivo o de mente abierta», en el que los límites de la explicación no están escritos en piedra

desde el principio. Al contrario, el naturalismo expansivo se reserva la libertad de construir capas de entendimiento que invocan todo, desde los ingredientes materiales de la naturaleza a las cualidades psicológicas de los enunciados matemáticos abstractos, como respuesta a la necesidad de explicar observaciones, experiencias y análisis (Barry Stroud, «The Charm of Naturalism», *Proceedings and Addresses of the American Philosophical Association* 70, n.º 2 [noviembre de 1996], pp. 43-55). El filósofo John Dupré ha defendido el «naturalismo pluralista», que argumenta que el sueño de la unidad en la ciencia es un mito peligroso, y que, bien al contrario, nuestras explicaciones deben surgir de «proyectos de indagación diversos y superpuestos» que se extiendan por las ciencias tradicionales y más allá para incluir, entre otras disciplinas, la historia, la filosofía y las artes (John Dupré, «The Miracle of Monism», en Mario De Caro y David Macarthur (eds.), *Naturalism in Question*, Harvard University Press, Cambridge, MA, 2004, pp. 36-58). Stephen Hawking y Leonard Mlodinow introdujeron la idea de «realismo dependiente de modelo», que describe la realidad en términos de una colección de relatos diferenciados, cada uno de ellos basado en un modelo o marco teórico distinto para explicar las observaciones, ya sea en el micromundo de las partículas o en el macromundo de los eventos cotidianos (Stephen Hawking y Leonard Mlodinow, *The Grand Design*, Bantam Books, Nueva York, 2010 [hay trad. cast.: *El gran diseño*, Crítica, Barcelona, 2010]. El físico Sean Carroll propone el «naturalismo poético» para referirse a las explicaciones que extienden el naturalismo científico para incluir el lenguaje y los conceptos proveídos a distintos dominios de interés (Sean Carroll, *The Big Picture*, Dutton, Nueva York, 2016). Y, como ya se ha apuntado en la nota 4 del capítulo 1, E. O. Wilson usa el término «consiliencia» para expresar el acercamiento entre el conocimiento de disciplinas muy dispares con el fin de alcanzar un conocimiento de una hondura que de otro modo no sería posible.

No soy muy amigo del argot, pero si tuviera que ponerle nombre a mi propio punto de vista, el que nos guiará en nuestra discusión a lo largo de todo este libro, lo llamaría «naturalismo encajado» (o «anidado»). El naturalismo encajado, como quedará claro en este capítulo y en los siguientes, está comprometido con el valor y la aplicabilidad universal del reduccionismo. Da por hecho que hay una unidad fundamental en el funcionamiento del mundo, y propone que esa unidad se hallará con la ayuda del programa reduccionista hasta la profundidad a la que nos lleve. Todo lo que tiene lugar en el mundo admite una descripción en términos de los constituyentes fundamentales,

siguiendo los dictados de las leyes fundamentales de la naturaleza. No obstante, el naturalismo encajado también pone énfasis en que esa descripción tiene un poder explicativo limitado. Hay muchos otros niveles de comprensión que envuelven el relato reduccionista del mismo modo que las partes externas de un nido envuelven su estructura interna. Y en función de lo que se pregunte, esos otros relatos explicativos pueden ser mucho más iluminadores que el relato que proporciona el reduccionismo. Todos los relatos deben ser mutuamente coherentes, pero de los de niveles superiores pueden surgir conceptos nuevos y útiles que no tengan correlato en niveles inferiores. Por ejemplo, cuando se estudian muchas moléculas de agua, el concepto de onda de agua (ola) tiene sentido y es útil. Cuando se estudia una sola molécula, no lo es. De modo parecido, para explorar las ricas y variadas historias de la experiencia humana, el naturalismo encajado invoca libremente relatos sobre la estructura que resulten ser más iluminadores, pero se asegura de que todos ellos se ajusten a una descripción coherente. <<

[9] En todo el libro, las referencias a la «vida» significan de manera implícita «la vida tal como la conocemos en el planeta Tierra», y no añadiré esta apostilla. <<

[10] Un obstáculo significativo en la formación de átomos de peso atómico elevado es que no hay núcleos estables que contengan cinco u ocho nucleones. A medida que se constituyen los núcleos por la adición secuencial de protones y neutrones (núcleos de hidrógeno y helio), la inestabilidad en los pasos cinco y ocho crea un cuello de botella que dificulta la nucleosíntesis en el Big Bang. <<

[11] Los cocientes que presento dan las abundancias relativas en masa. Como un núcleo de helio tiene más o menos cuatro veces la masa de un núcleo de hidrógeno, un recuento del número de átomos de hidrógeno comparado con el número de átomos de helio da una razón distinta, de aproximadamente 92 % de hidrógeno y 8 % de helio. <<

[12] Para una historia completa, véase Helge Kragh, «Naming the Big Bang», *Historical Studies in the Natural Sciences* 44, n.º 1 (febrero de 2014), p. 3. Kragh sugiere que aunque Hoyle prefería su propia teoría cosmológica (el modelo de estado estacionario, en el que el universo siempre ha existido), su uso del término «Big Bang» podría no haber tenido una intención de burla. Tal vez Hoyle usó «Big Bang» como una forma colorista de distinguir su propia teoría de la competidora. <<

[13] S. E. Woosley, A. Heger y T. A. Weaver, «The evolution and explosion of massive stars», *Reviews of Modern Physics* 74 (2002), p. 1015. <<

[14] Un estudio analizó cientos de miles de trayectorias posibles y llegó a la conclusión de que casi todas ellas habrían requerido que el Sol se hubiera eyectado a una velocidad tan alta que habría perdido el disco protoplanetario o se habrían dispersado los planetas, en el caso de que ya se hubiesen formado (Bárbara Pichardo, Edmundo Moreno, Christine Allen *et al.*, «The Sun was not born in M67», *The Astronomical Journal* 143, n.º 3 [2012], p. 73). Otro estudio, que hace suposiciones distintas sobre el lugar donde se habría formado el propio Messier 67, concluye que habría bastado una velocidad de eyección más lenta para lanzar el Sol y que, a esta menor velocidad, habría conservado los planetas o el disco protoplanetario (Timmi G. Jørgensen y Ross P. Church, «Stellar escapers from M67 can reach solar-like Galactic orbits», arxix.org, arXiv:1905.09586). <<

[15] A. J. Cavosie, J. W. Valley y S. A. Wilde, «The Oldest Terrestrial Mineral Record: Thirty Years of Research on Hadean Zircon from Jack Hills, Western Australia», en M. J. Van Kranendonk (ed.), *Earth's Oldest Rocks*, Elsevier, Nueva York, 2018, pp. 255-278. Los datos más recientes son coherentes con el estudio original descrito en John W. Valley, William H. Peck, Elizabeth M. King y Simon A. Wilde, «A Cool Early Earth», *Geology* 30 (2002), pp. 351-354; John Valley, comunicación personal, 30 de julio de 2019. <<

[16] Werner Heisenberg, *Physics and Philosophy: The Revolution in Modern Science*, Penguin Books, Londres, 1958, p. 16. <<

[17] Max Born, «Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge», *Zeitschrift für Physik* 37, n.º 12 (1926), pp. 863-867. <<

[18] El principio de exclusión de Pauli, que comentaremos más a fondo en el capítulo 9, también es esencial para determinar los orbitales cuánticos permitidos para los electrones alrededor del núcleo. Este principio establece que dos electrones (o, de manera más general, dos partículas de materia del mismo tipo) no pueden ocupar el mismo estado cuántico. En consecuencia, cada uno de los orbitales cuánticos individuales que define la ecuación de Schrödinger puede acoger a lo sumo un electrón (o, si se incluye el grado de libertad del espín, dos electrones). Muchos de estos orbitales poseen la misma energía, lo que en nuestra analogía correspondería a asientos situados al mismo nivel en el teatro cuántico. Pero cada vez que se ocupan estos asientos (cada vez que se ocupan un orbital cuántico) ese nivel ya no puede acoger más electrones. <<

[19] Si el lector recuerda la química de bachillerato, comprenderá que he simplificado un poco las cosas. En una descripción más precisa, habría que señalar que (a causa de la mecánica cuántica) los átomos organizan sus filas en varias subfilas con momentos angulares distintos. A veces una fila más alta, con menor momento angular, tiene menos energía que una fila más baja con más momento angular. En ese caso, los electrones ocupan esa subfila de un nivel superior antes de completar la fila inferior. <<

[20] De manera más precisa, la estabilidad se consigue cuando se llena la subcapa exterior de un átomo (la capa de valencia). El lector quizá recuerda del instituto la «regla del ocho» que dice que los átomos suelen necesitar ocho electrones en su capa de valencia, de modo que donarán, aceptarán o compartirán electrones con otros átomos para alcanzar ese número. <<

[21] Albert Szent-Györgyi, «Biology and Pathology of Water», *Perspectives in Biology and Medicine* 14, n.º 2 (1971), p. 239. <<

[22] En este capítulo nos centramos en las plantas y los animales, que están constituidos por células eucariotas (células que contienen un núcleo). Los investigadores dicen, en este caso, que los linajes convergen en el «último antepasado común eucariota» o LECA (por sus siglas en inglés). De manera más general, si también tomamos en cuenta las bacterias y las arqueas, los linajes convergen más atrás en el «último antepasado común universal» o LUCA. <<

[23] A. Auton, L. Brooks, R. Durbin *et al.*, «A global reference for human genetic variation», *Nature* 526, n.º 7571 (octubre de 2015), p. 68. <<

[24] Los científicos han desarrollado varias medidas para comparar el solapamiento de ADN entre especies. Una manera de hacerlo consiste en comparar pares de bases para los genes que comparten todas las especies (este es el origen del 1 % de diferencia genética entre humanos y chimpancés al que nos hemos referido), mientras que otra manera consiste en comparar genomas enteros (y entonces la diferencia entre humanos y chimpancés es un poco mayor). <<

[25] En rigor, los investigadores describen el código explicado en el siguiente párrafo como «casi» universal para reflejar el hecho de que en algunos casos particulares y especiales se han observado variaciones. No obstante, incluso esas modestas modificaciones comparten la misma estructura básica de codificación que se describe en el capítulo. <<

[26] Con códigos de tres letras y cuatro letras distintas hay 64 combinaciones posibles. Pero como estas secuencias codifican solamente 20 aminoácidos, hay varias secuencias distintas que pueden codificar el mismo aminoácido (como efectivamente ocurre). Históricamente, entre los primeros artículos que desentrañaron este código están: F. H. C. Crick, Leslie Barnett, S. Brenner y R. J. Watts-Tobin, «General nature of the genetic code for proteins», *Nature* 192 (1961), pp. 1227-1232, y J. Heinrich Matthaei, Oliver W. Jones, Robert G. Martin y Marshall W. Nirenberg, «Characteristics and Composition of Coding Units», *Proceedings of the National Academy of Sciences* 48, n.º 4 (1962), pp. 666-677. A mediados de la década de 1960, gracias a los esfuerzos de varios investigadores, y en particular de Marshall Nirenberg, Robert Holley y Har Gobind Khorana, se completó el código, lo que valió a estos tres científicos el premio Nobel de 1968. <<

[27] La definición precisa de un gen todavía es objeto de debate. Además de la información que codifica proteínas, un gen comprende secuencias auxiliares (que no tienen por qué ser contiguas a la región codificadora) que pueden influir en la forma precisa en que la célula utiliza los datos codificados (por ejemplo, aumentando o inhibiendo la tasa de producción de una proteína determinada, entre otras funciones reguladoras). **<<**

[28] La idea central (corrientes eléctricas basadas en protones que impulsan la síntesis de ATP), fue propuesta por el bioquímico británico Peter Mitchell, y le valió el premio Nobel en 1978. (P. Mitchell, «Coupling of phosphorylation to electron and hydrogen transfer by a chemiosmotic type of mechanism», *Nature* 191 [1961], pp. 144-148). Aunque varios detalles de la propuesta de Mitchell requirieron refinamientos posteriores, fue galardonado con el premio Nobel por sus ideas sobre la «transferencia biológica de la energía». Mitchell fue un científico inusual. Harto de diversas manifestaciones de vacuidad del mundo académico (puedo simpatizar con él), fundó una compañía independiente sin ánimo de lucro, Glynn Research, desde donde, con varios colegas y una plantilla de diez trabajadores, realizó investigaciones bioquímicas. Los detalles de su fascinante vida se pueden encontrar en John Prebble y Bruce Weber, *Wandering in the Gardens of the Mind: Peter Mitchell and the Making of Glynn*, Oxford University Press, Oxford, 2003. Para más detalles sobre el conocimiento actual sobre la extracción y el transporte de energía en la célula, véase, por ejemplo, Bruce Alberts *et al.*, *Molecular Biology of the Cell*, 5.ª ed., Garland Science, Nueva York, 2007), capítulo 14. El lector bien informado sabrá de una excepción a la universalidad de este proceso: la extracción de energía por «fermentación» (un proceso de extracción de energía que no utiliza oxígeno). <<

[29] Charles Darwin, *The Origin of Species*, Pocket Books, Nueva York, 2008 [hay trad. cast.: *El origen de las especies*, Austral, Barcelona, 1998]. <<

[30] En mi analogía imagino que un negocio somete repetidamente su producto a ensayo y error. Sin embargo, hay otras maneras de integrar el ensayo y error de una forma más eficaz. Por ejemplo, durante el desarrollo de algoritmos de computación, los informáticos comienzan con un algoritmo, lo modifican al azar, descartan los cambios que reducen su velocidad, y optan más por los que la conservan (es decir, los algoritmos modificados que incrementan la velocidad). La reiteración de este procedimiento constituye un enfoque inspirado en la selección natural que muestrea un amplio abanico de posibilidades y conduce al desarrollo de procedimientos computacionales más rápidos. Naturalmente, estudiar algoritmos modificados en un ordenador es mucho menos costoso que probar cómo se comporta en el mercado un producto modificado al azar. Así pues, el ensayo y error ciego puede ser una estrategia útil en diversas tareas, pero solo cuando el coste en tiempo y recursos para producir las tandas de pruebas con modificaciones al azar sea pequeño (o las modificaciones se puedan ensayar en masa en paralelo). <<

[31] Eric T. Parker, Henderson J. Cleaves, Jason P. Dworkin *et al.*, «Primordial synthesis of amines and amino acids in a 1958 Miller H2S-rich spark discharge experiment», *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108, n.º 14 (abril de 2011), pp. 5526-5531. <<

[32] Los envoltorios celulares pueden formarse de manera natural a partir de sustancias químicas comunes, como los ácidos grasos, que poseen un extremo que busca el agua y otro que la evita. Esta relación con el agua puede llevar a estas moléculas a formar unas dobles barreras, con los extremos de las moléculas que son afines al agua hacia fuera y los extremos que la repelen hacia dentro, juntando las dos láminas en una doble capa. Para una discusión en el contexto del mundo de ARN, véase G. F. Joyce y J. W. Szostak, «Protocells and RNA Self-Replication», *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology* 10, n.º 9 (2018). <<

[33] Varios investigadores, entre ellos el químico Svante Arrhenius, el astrónomo Fred Hoyle, el astrobiólogo Chandra Wickramasinghe, el físico Paul Davies y otros, han sugerido que algunas de las rocas que cayeron podrían haber traído con ellas semillas de vida especialmente resistentes, moléculas ya sintetizadas que podían replicarse y catalizar reacciones. Por interesante que sea, pues plantea la posibilidad de que rocas del espacio portadoras de vida hayan sembrado un gran número de planetas en todo el cosmos, la propuesta no supone un avance en nuestro conocimiento sobre el origen de la vida, pues no hace más que trasladar la pregunta al origen de esas semillas. <<

[34] David Deamer, *Assembling Life: How Can Life Begin on Earth and Other Habitable Planets?*, Oxford University Press, Oxford, 2018. <<

[35] A. G. Cairns-Smith, *Seven Clues to the Origin of Life*, Cambridge University Press, Cambridge, 1990. <<

[36] W. Martin y M. J. Russell, «On the origin of biochemistry at an alkaline hydrothermal vent», *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 367 (2007), p. 1187. <<

[37] Erwin Schrödinger, *What Is Life?*, Cambridge University Press, Cambridge, 2012, p. 87 [hay trad. cast.: *¿Qué es la vida?*, Tusquets, Barcelona, 1984]. <<

[38] La energía de los fotones entrantes está más concentrada (tienen longitudes de onda más cortas, están en la parte visible del espectro y son menos numerosos) y, por tanto, es de mayor calidad; la energía de los fotones salientes está más diluida (tienen longitudes de onda más largas, están en la parte infrarroja del espectro y son más numerosos) y son, por tanto, de menor calidad. Así pues, la utilidad de la energía solar no se deriva únicamente de la voluminosa cantidad de energía que suministra el Sol, sino también del hecho de que se trata de energía de alta calidad, con mucha menos entropía que el calor que la Tierra devuelve al espacio. Como ya hemos comentado en el capítulo, por cada fotón que nuestro planeta recibe del Sol, irradia de vuelta al espacio un par de docenas. Para estimar este número, nótese que los fotones del Sol son emitidos por un cuerpo con una temperatura de unos 6000 K (la temperatura de la superficie del Sol), mientras que los liberados por la Tierra son emitidos por un cuerpo con temperatura de unos 285 K (la temperatura superficial de la Tierra). La energía de un fotón es proporcional a esas temperaturas (considerando que los fotones son un gas ideal de partículas), de modo que la razón entre los fotones que la Tierra recibe del Sol y absorbe respecto a los que luego emite viene dada por el cociente entre las dos temperaturas, 6000 K/285 K, que corresponde a unos 21 fotones, o más o menos dos docenas. <<

[39] Erwin Schrödinger, *What Is Life?*, Cambridge University Press, Cambridge, 2012, p. 87 [hay trad. cast.: *¿Qué es la vida?*, Tusquets, Barcelona, 1984]. <<

[40] Albert Einstein, *Autobiographical Notes*, Open Court Publishing, La Salle, IL, 1979, p. 3 [hay trad. cast.: *Notas autobiográficas*, Alianza, Madrid, 2016]. Para un elegante tratamiento moderno de los principios de la termodinámica en el contexto de los sistemas vivos, con ejemplos esclarecedores que ilustran muchos de los conceptos esenciales a los que nos referimos aquí, véase Philip Nelson, *Biological Physics: Energy, Information, Life*, W. H. Freeman and Co., Nueva York, 2014. <<

[41] J. L. England, «Statistical physics of self-replication», *Journal of Chemical Physics* 139 (2013), 121923. Nikolay Perunov, Robert A. Marsland y Jeremy L. England, «Statistical Physics of Adaptation», *Physical Review X* 6 (junio de 2016), 021036-1; Tal Kachman, Jeremy A. Owen y Jeremy L. England, «Self-Organized Resonance During Search of a Diverse Chemical Space», *Physical Review Letters* 119, n.º 3 (2017), 038001-1. Véase también G. E. Crooks, «Entropy production fluctuation theorem and the nonequilibrium work relation for free energy differences», *Physical Review E* 60 (1999), 2721; y C. Jarzynski, «Nonequilibrium equality for free energy differences», *Physical Review Letters* 78 (1997), p. 2690. <<

[42] England también señala que como la estructura física de una entidad viva no está tan solo momentáneamente ordenada, sino que mantiene su orden durante largos períodos de tiempo (incluso durante algún tiempo después de su muerte), una parte significativa de la energía residual que la vida produce debe derivarse de la construcción de esas estructuras estables. Así pues, podría ser que en la vida una contribución dominante al paso a dos de la entropía se encuentre vinculada a la formación de estructura, además de a la continua preservación de la homeostasis. Además, aunque los sistemas vivos requieren energía de alta calidad, también necesitan que esa energía no se encuentre en una forma que perturbe la organización interna del sistema. A modo de ilustración mecánica, con un tono de la frecuencia apropiada puede conseguirse que una copa de vino vibre, pero si se transfiere demasiada energía, la copa se hace añicos. Para evitar un resultado análogo, en un sistema disipativo deben agruparse varios grados de libertad en configuraciones que eviten la resonancia con la energía que llega del entorno. La vida requiere de un ajustado equilibrio entre los extremos. <<

[1] Albert Camus, *The Myth of Sisyphus*, trad. de Justin O'Brien, Hamish Hamilton, Londres, 1955, p. 18 [hay trad. cast.: *El mito de Sísifo*, Alianza, Madrid, 1996]. <<

[2] Ambrose Bierce, *The Devil’s Dictionary*, The Peter Pauper Press, Mount Vernon, NY, 1958, p. 14 [hay trad. cast.: *El diccionario del diablo*, Cátedra, Madrid, 2010]. <<

[3] Will Durant, *The Life of Greece*, vol. 2 de *The Story of Civilization*, Simon & Schuster, 2011, pos. 8181-8182, Kindle. **<<**

[4] Ya que a menudo menciono las ecuaciones matemáticas que articulan las leyes de la física, merece la pena que dediquemos un momento a escribir la versión más refinada que tenemos de esas ecuaciones. Aun sin entender todos los símbolos, puede resultar interesante observar su «aspecto» general.

Las ecuaciones de campo de Einstein, de la teoría general de la relatividad, son: $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$, donde el lado izquierdo de la ecuación describe la curvatura del espacio-tiempo, además de la constante cosmológica, Λ, y el lado derecho describe la masa y energía que es fuente de la curvatura (la fuente del campo gravitatorio). En esta expresión (y en las que siguen) los índices griegos van de 0 a 3 y representan las cuatro coordenadas del espacio-tiempo.

Las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo son $\partial^{\alpha}F_{\alpha\beta} = \mu_0 J_{\beta}$ y $\partial_{[\alpha}F_{\rho\sigma]} = 0$, donde el lado izquierdo de las ecuaciones describe los campos eléctrico y magnético, y el lado derecho de la primera ecuación describe las cargas eléctricas que dan origen a estos campos.

Las ecuaciones de las fuerzas nucleares fuerte y débil son generalizaciones de las ecuaciones de Maxwell. La característica nueva esencial es que mientras en la teoría de Maxwell podemos escribir la «intensidad de campo» $F_{\alpha\beta} = \partial_{\alpha}A_{\beta} - \partial_{\beta}A_{\alpha}$ en función de A_{α}, que se conoce como «potencial vectorial», para las fuerzas nucleares hay un conjunto de intensidades de campo $F^{a}_{\alpha\beta} = \partial_{\alpha}A^{a}_{\beta} - \partial_{\beta}A^{a}_{\alpha} + gf^{abc}A^{b}_{\alpha}A^{c}_{\beta}$. Los índices romanos recorren los generadores de las álgebras de Lie su(2) para la fuerza nuclear débil y su(3) para la fuerza nuclear fuerte, y f^{abc} son las constantes de estructura de estas álgebras.

La ecuación de Schrödinger de la mecánica cuántica es $i\hbar\frac{\partial\Psi}{\partial\tau} = H\psi$, donde H es el hamiltoniano y ψ es la función de onda, cuyo módulo (apropiadamente normalizado) elevado al cuadrado proporciona las probabilidades de la mecánica cuántica. La unión de la mecánica cuántica y las fuerzas electromagnética y nucleares débil y fuerte, incluyendo además las partículas conocidas de la materia y la partícula de Higgs, constituye el modelo estándar de la física de partículas. Por lo general, el modelo estándar se expresa mediante un formalismo equivalente pero distinto conocido como integral de caminos (una aproximación original del físico Richard Feynman). La unión

de la mecánica cuántica y la relatividad general es un tema candente de la investigación avanzada. <<

[5] Augustine, *Confessions*, trad. F. J. Sheed, Hackett Publishing, Indianápolis, IN, 2006, p. 197 [hay trad. cast.: San Agustín, *Confesiones*, Planeta, Barcelona, 1993]. <<

[6] Thomas Aquinas, *Questiones Disputatae de Veritate*, cuestiones 10-20, trad. James V. McGlynn, S. J., Henry Regnery Company, Chicago, 1953. <https://dhspriory.org/thomas/QDdeVer10.htm#8> [hay trad. cast.: *Cuestiones disputadas sobre la verdad*, EUNSA, Pamplona, 2016]. <<

[7] William Shakespeare, *Measure for Measure*, ed. de J. M. Nosworthy, Penguin Books, Londres, 1995, p. 84 [hay trad. cast.: *Medida por medida*, Planeta DeAgostini, Barcelona, 2000]. <<

[8] Gottfried Leibniz, carta a Christian Goldbach, 17 de abril de 1712. <<

[9] Otto Loewi, «An Autobiographical Sketch», *Perspectives in Biology and Medicine* 4, n.º 1 (otoño de 1960), pp. 3-25. Loewi anotó incorrectamente que el sueño había tenido lugar el Domingo de Pascua de 1920, cuando en realidad fue en 1921. <<

[10] Para una historia en profundidad, véase Henri Ellenberger, *The Discovery of the Unconscious*, Basic Books, Nueva York, 1970 [hay trad. cast.: *El descubrimiento del inconsciente*, Gredos, Madrid, 1976]. <<

[11] Peter Halligan y John Marshall, «Blindsight and insight in visuospatial neglect», *Nature* 336, n.º 6201 (22-29 de diciembre de 1988), pp. 766-767. <<

[12] El culpable fue James Vicary, que en 1957 afirmó que los destellos subliminales que animaban a las audiencias a comer palomitas y beber Coca-Cola producían aumentos significativos en las ventas de ambos. Más tarde, Vicary admitió que aquellas afirmaciones no se sostenían. <<

[13] Los investigadores han establecido la capacidad de una gran variedad de estímulos subliminales para influir en actividades conscientes. En este párrafo describo un ejemplo, las influencias subliminales en una simple determinación numérica. Pero se han demostrado influencias parecidas en el reconocimiento de palabras (véase, por ejemplo, Anthony J. Marcel, «Conscious and Unconscious Perception: Experiments on Visual Masking and Word Recognition», *Cognitive Psychology* 15 (1983), pp. 197-237), así como en la percepción y evaluación de un amplio espectro de imágenes y objetos. <<

[14] L. Naccache y S. Dehaene, «The Priming Method: Imaging Unconscious Repetition Priming Reveals an Abstract Representation of Number in the Parietal Lobes», *Cerebral Cortex* 11, n.º 10 (2001), pp. 966-974; L. Naccache y S. Dehaene, «Unconscious Semantic Priming Extends to Novel Unseen Stimuli», *Cognition* 80, n.º 3 (2001), pp. 215-229. Nótese que en estos experimentos el estímulo inicial se torna subliminal por medio de un proceso de enmascaramiento mediante el cual antes y después del estímulo se muestran destellos de formas geométricas. Para una revisión, véase Stanislas Dehaene y Jean-Pierre Changeux, «Experimental and Theoretical Approaches to Conscious Processing», *Neuron* 70, n.º 2 (2011), pp. 200-227, y Stanislas Dehaene, *Consciousness and the Brain*, Penguin Books, Nueva York, 2014. <<

[15] Isaac Newton, carta a Henry Oldenburg, 6 de febrero de 1671. <http://www.newtonproject.ox.ac.uk/view/texts/normalized/NATP00003> **<<**

[16] Filósofos, psicólogos, místicos y toda suerte de pensadores han defendido definiciones distintas de la conciencia. En función del contexto, algunas pueden ser más útiles que el enfoque que hemos adoptado aquí, otras menos. Nuestra discusión se centra en el «problema difícil» y, para este propósito, la descripción que se da en el capítulo nos será de utilidad. <<

[17] Mi referencia aquí a protones, neutrones y electrones es una expresión concisa del estado de mi cerebro articulado en términos de los ingredientes más básicos de la naturaleza, sean esos ingredientes los que finalmente resulten ser (partículas, campos, cuerdas, etc.). <<

[18] Thomas Nagel, «What Is It Like to Be a Bat?», *Philosophical Review* 83, n.º 4 (1974), pp. 435-450. <<

[19] Cuando hablo de entender los volcanes o los tifones (o cualquier otro cuerpo macroscópico) en términos de partículas fundamentales, lo hago desde una perspectiva de «en principio». Como la teoría del caos ha puesto de manifiesto repetidamente, diferencias minúsculas en las condiciones iniciales de un conjunto de partículas producirán enormes diferencias en la configuración futura de las partículas. Esto es cierto incluso para conjuntos pequeños. En la práctica, este hecho afecta de manera considerable las predicciones que podemos hacer, pero no supone ningún misterio. La teoría del caos proporciona un conjunto relevante y profundo de perspectivas, pero la teoría no se desarrolló para llenar ninguna laguna que se hubiera percibido en nuestro conocimiento de las leyes físicas subyacentes. No obstante, cuando se trata de la conciencia, el problema planteado en el capítulo (¿cómo pueden unas partículas mecánicas producir sensaciones mentales?) ha sugerido a algunos investigadores que existe una laguna de una naturaleza mucho más fundamental. Lo que estos arguyen es que las sensaciones de la mente no pueden emerger de un conjunto grande de partículas, con independencia de los movimientos coordinados que puedan seguir. <<

[20] Frank Jackson, «Epiphenomenal Qualia», *Philosophical Quarterly* 32 (1982), pp. 127-136. <<

[21] Daniel Dennett, *Consciousness Explained*, Little, Brown and Co., Boston, 1991, pp. 399-401 [hay trad. cast.: *Las conciencia explicada: una teoría interdisciplinar*, Paidós, Barcelona, 1995]. <<

[22] David Lewis, «What Experience Teaches», *Proceedings of the Russellian Society* 13 (1988), pp. 29-57. Reimpreso en David Lewis, *Papers in Metaphysics and Epistemology*, Cambridge University Press, Cambridge, 1999, pp. 262-290, que se basa en reflexiones anteriores de Laurence Nemirow, «Review of Nagel’s Mortal Questions», *Philosophical Review* 89 (1980), pp. 473-477. <<

[23] Laurence Nemirow, «Physicalism and the cognitive role of acquaintance», en W. Lycan (ed.), *Mind and Cognition*, Blackwell, Oxford, 1990, pp. 490-499. <<

[24] Frank Jackson, «Postscript on Qualia», en *Mind, Method, and Conditionals, Selected Essays*, Routledge, Londres, 1998, pp. 76-79. <<

[25] En su artículo de 1995, Chalmers discute el vitalismo y el electromagnetismo como referencias útiles para pensar sobre el problema difícil. La característica clave que distingue al problema difícil, tal como lo define Chalmers, es que necesariamente aborda cualidades subjetivas de la experiencia y por consiguiente, según argumenta, no puede resolverse mediante la adquisición de un conocimiento más detallado de las funciones objetivas del cerebro. En esta sección me parece útil enmarcar el problema de un modo un tanto distinto, contrastando las cuestiones abiertas que la ciencia puede resolver, al menos en principio, usando el paradigma actualmente vigente (que define el ámbito dentro del cual la realidad, tal como la conocemos, tiene lugar) y cuestiones abiertas para las que este paradigma puede resultar inadecuado. En este marco, un problema es difícil de resolver si nos obliga a modificar de manera fundamental el enfoque existente para describir el mundo; en el ejemplo de la electricidad y el magnetismo, los científicos tuvieron que introducir cualidades fundamentalmente nuevas (campos eléctricos y magnéticos que llenan el espacio y cargas eléctricas). Con referencia a la posición de Chalmers según la cual el problema difícil no se puede resolver utilizando únicamente los ingredientes materiales que están en el núcleo de nuestras descripciones físicas fundamentales de la realidad, el marco que yo presento, aunque distinto, capta una parte esencial de la cuestión. Nótese, además, que según Chalmers, la razón misma de que el vitalismo desapareciese gradualmente es que la cuestión que abordaba se *refería* a una función objetiva: ¿Cómo pueden unos ingredientes físicos llevar a cabo las funciones objetivas de la vida? A medida que la ciencia fue entendiendo mejor las capacidades funcionales de los ingredientes físicos (moléculas bioquímicas y demás), el enigma que el vitalismo intentaba abordar de fue disipando. Según Chalmers, esta progresión no se repetirá con el problema difícil. Los fisicalistas no comparten esta intuición y, por ende, anticipan que los progresos en nuestra comprensión de la función cerebral nos ayudarán a entender la experiencia subjetiva. Para más detalles, véase David Chalmers, «Facing Up to the Problem of Consciousness», *Journal of Consciousness Studies* 2, n.º 3 (1995), pp. 200-219, y David Chalmers, *The Conscious Mind: In Search of a Fundamental Theory*, Oxford University Press, Oxford, 1997, p. 125 [hay trad. cast.: *La mente consciente: en busca de una teoría fundamental*, GEDISA, Barcelona, 1999]. <<

[26] Hay en la literatura clínica innumerables casos que muestran que la resección de partes concretas del cerebro produce la pérdida de funciones cerebrales bien definidas. Uno de esos casos me resulta especialmente cercano. Tras una operación quirúrgica para extirpar un tumor maligno, mi esposa, Tracy, perdió de manera temporal la capacidad de pronunciar una amplia variedad de nombres comunes. Tal como ella lo describe, era como si la cirugía le hubiese seccionado el banco de datos en el que guardaba su conocimiento de los nombres de diversas cosas. Podía invocar una imagen mental de esos nombres, por ejemplo un par de zapatos rojos, pero era incapaz de nombrar la imagen que tenía en la mente. <<

[27] Giulio Tononi, *Phi: A Voyage from the Brain to the Soul*, Pantheon, Nueva York, 2012; Christof Koch, *Consciousness: Confessions of a Romantic Reductionist*, MIT Press, Cambridge, MA, 2012; Masafumi Oizumi, Larissa Albantakis y Giulio Tononi, «From the Phenomenology to the Mechanisms of Consciousness: Integrated Information Theory 3.0», *PLoS Computational Biology* 10, n.º 5 (mayo de 2014). <<

[28] Scott Aaronson, «Why I Am Not an Integrated Information Theorist (or, The Unconscious Expander)», Shtetl-Optimized. <https://www.scottaaronson.com/blog/?p=1799> <<

[29] Michael Graziano, *Consciousness and the Social Brain*, Oxford University Press, Nueva York, 2013; Taylor Webb y Michael Graziano, «The attention schema theory: A mechanistic account of subjective awareness», *Frontiers in Psychology* 6 (2015), p. 500. <<

[30] La percepción humana del color es mucho más compleja de lo que sugiere mi breve descripción. Nuestros ojos tienen receptores con sensibilidades variables a lo largo del intervalo de frecuencias de la luz. Unos son más sensibles a las frecuencias visibles más altas; otros, a las frecuencias más bajas; y aún otros, a frecuencias que caen entre los extremos. Los colores que nuestro cerebro percibe son el resultado de la mezcla de las respuestas de los distintos receptores. <<

[31] Como en la nota anterior, esto es una simplificación, puesto que el «rojo» es la interpretación que hace el cerebro de una mezcla de respuestas a varias frecuencias recibidas por sus receptores visuales. No obstante, la versión simplificada comunica lo esencial: nuestra sensación de color es una representación útil pero imprecisa de los datos físicos que las ondas electromagnéticas traen hasta nuestros ojos. <<

[32] David Premack y Guy Woodruff, «Does the chimpanzee have a theory of mind?», *Cognition and Consciousness in Nonhuman Species*, número especial de *Behavioral and Brain Sciences* 1, n.º 4 (1978), pp. 515-526. <<

[33] Daniel Dennett, *The Intentional Stance*, MIT Press, Cambridge, MA, 1989 [hay trad. cast.: *La actitud intencional*, GEDISA, Barcelona, 1991]. <<

[34] Véanse, por ejemplo, el modelo de Dennett de las versiones (o borradores) múltiples en Daniel Dennett, *Consciousness Explained*, Little, Brown and Co., Boston, 1991, pp. 399-401 [hay trad. cast.: *La conciencia explicada: una teoría interdisciplinar*, Paidós, Barcelona, 1995], la teoría de Baar del espacio de trabajo global en Bernard J. Baars, *In the Theater of Consciousness*, Oxford University Press, Nueva York, 1997, y la teoría de Hameroff y Penrose de la reducción orquestada en Stuart Hameroff y Roger Penrose, «Consciousness in the universe: A review of the 'Orch OR' theory», *Physics of Life Reviews* 11 (2014), pp. 39-78. <<

[35] Aunque toda la mecánica cuántica se remonta a la ecuación de Schrödinger, en las décadas que han transcurrido desde la introducción de la teoría, muchos físicos han desarrollado considerablemente el formalismo matemático. La predicción tan precisa a la que me refiero surge de cálculos en un campo de la mecánica cuántica conocido como electrodinámica cuántica, que fusiona la mecánica cuántica con la teoría de Maxwell de electromagnetismo. <<

[36] Una forma alternativa de expresarlo es que, según la mecánica cuántica, el electrón, antes de ser medido, no tiene una posición en el sentido convencional del término. <<

[37] Como ya se ha señalado en la nota 5 del capítulo 3, hay una versión de la mecánica cuántica en la que las partículas no retienen trayectorias nítidas y definidas, lo cual ofrece una posible solución al problema de la medición cuántica. Hasta el momento, solo un reducido grupo de investigadores en todo el mundo exploran este enfoque, conocido como mecánica bohmiana o mecánica de Broglie-Bohm. Aunque no sea el candidato con más números, no descarto que la mecánica bohmiana pueda llegar a convertirse en una perspectiva dominante en el futuro. Otra aproximación al problema de la medición cuántica es la interpretación de los muchos mundos, según la cual todos los resultados potenciales que permite la evolución mecánica cuántica se convierten en realizaciones en el momento de la medición. Y una tercera propuesta es la teoría de Ghirardi-Rimini-Weber (GRW), que introduce un proceso físico nuevo y fundamental que raramente, pero de forma aleatoria, colapsa la onda de probabilidad para una partícula individual. Para conjuntos pequeños de partículas, el proceso ocurre con una frecuencia demasiado baja como para influir en los resultados de los experimentos cuánticos satisfactorios. Pero para grandes conjuntos de partículas, el proceso se produce mucho más deprisa, creando un efecto dominó que selecciona precisamente un resultado posible como realización en el macromundo. Para más detalles, véase, por ejemplo, *El tejido del cosmos*, capítulo 7. <<

[38] Fritz London y Edmond Bauer, *La théorie de l'observation en mécanique quantique*, n.º 775 de *Actualités scientifiques et industrielles; Exposés de physique générale, publiés sous la direction de Paul Langevin*, Hermann, París, 1939, en traducción de John Archibald Wheeler y Wojciech Zurek, *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, Princeton, 1983, p. 220. <<

[39] Eugene Wigner, *Symmetries and Reflections*, MIT Press, Cambridge, MA, 1970. <<

[40] Aristóteles definía una acción como «voluntaria» si comenzaba con un agente dado y surgía de las propias deliberaciones de ese agente, una perspectiva que, con refinamientos sustanciales, ha ejercido una considerable influencia. Véase Aristotle, *Nicomachean Ethics*, trad. de C. D. C. Reeve, Hackett Publishing, Indianapolis, IN, 2014, pp. 35-41 [hay trad. cast.: Aristóteles, *Ética a Nicómaco*, Gredos, Madrid, 2010]. Aristóteles no incluyó leyes deterministas de la física entre las fuerzas externas capaces de hacer involuntaria una acción, pero quienes, como yo, consideramos esas influencias fundamentales aunque impersonales, hallamos que este concepto de «voluntario» no se alinea con nuestras intuiciones acerca del libre albedrío. <<

[41] Como en la nota 17 de este capítulo, cuando hablo de las partículas que constituyen un objeto macroscópico me refiero, de manera abreviada, al estado físico completo del objeto. Tradicionalmente, este estado viene dado por las posiciones y velocidades de los constituyentes fundamentales del objeto. Dentro de la mecánica cuántica, el estado viene definido por la función de onda que describe los constituyentes del objeto. Ahora bien, mi énfasis sobre las partículas puede dejar dudas sobre los campos. El lector con la adecuada formación técnica sabrá que la teoría de campos cuántica nos dice que la influencia de un campo es transmitida por partículas (por ejemplo, la influencia del campo electromagnético es transmitida por fotones); además, la teoría de campos cuántica también demuestra que un campo macroscópico puede describirse matemáticamente como una configuración determinada de partículas, lo que se conoce como un «estado coherente» de partículas. Así pues, mi referencia a «partículas» pretende englobar también a los campos. El lector informado también sabrá que ciertas características cuánticas, como el entrelazamiento cuántico, pueden hacer que el estado de un objeto sea un concepto más sutil en un escenario cuántico que en un escenario clásico. Para la mayor parte de lo que discutiremos, podemos pasar por alto esas sutilezas; el progreso implacable y unitario del mundo físico es, fundamentalmente, todo lo que necesitaremos. <<

[42] De manera más precisa, la probabilidad de que las partículas de una roca conspiren para saltar del banco es tan ridículamente pequeña que a las escalas temporales de interés puede ignorarse la posibilidad estadística de que la roca me salve. <<

[43] La literatura filosófica está repleta de propuestas compatibilistas. Entre estas, la que describo se acerca sobre todo a la que propone y desarrolla Daniel Dennett en *Freedom Evolves* (Penguin Books, Nueva York, 2003) y también en *Elbow Room* (MIT Press, Cambridge, MA, 1984). A estas obras refiero al lector para una discusión más a fondo. Vengo reflexionando sobre estas ideas desde la primera vez que me incitó a pensar sobre ellas Luise Vosgerchian, que se cuenta entre mis profesores más influyentes. Vosgerchian, que era profesora de música en Harvard, estaba profundamente interesada en cómo se relacionaban los descubrimientos científicos con las sensibilidades estéticas, y me pidió que escribiera sobre la libertad y la creatividad humanas desde el punto de vista de la física moderna. <<

[44] La inteligencia artificial y el aprendizaje automático subrayan aún con más fuerza esta cuestión. Los investigadores han desarrollado algoritmos para juegos como el ajedrez o Go que pueden actualizarse a sí mismos a partir del análisis del éxito o el fracaso de movimientos previos. Dentro de la computadora que alberga un algoritmo, todo lo que hay son partículas que se mueve en una dirección u otra bajo el pleno control de la ley física. Aun así, el algoritmo mejora. El algoritmo aprende. Los movimientos del algoritmo se tornan creativos. Tan creativos, de hecho, que tras varias horas de esa actualización interna, los sistemas más avanzados pueden pasar de jugar como un principiante a ganar a maestros mundiales. Véase David Silver, Thomas Hubert, Julian Schrittwieser *et al.*, «A general reinforcement learning algorithm that masters chess, shogi, and Go through self-play», *Science* 362 (2018), pp. 1140-1144. <<

[45] La cuestión es que si «yo» soy mi configuración de partículas, cuando esa configuración cambia, tanto en organización como en composición, ¿sigo siendo yo? Es una versión más de otra de las preguntas enjundiosas de la filosofía (la personalidad en el tiempo), por lo que ha generado un amplio abanico de puntos de vista y respuestas. Yo me inclino por el enfoque de Robert Nozick, en el que, por usar un lenguaje un tanto técnico, identificamos mi futuro yo minimizando una función de distancia sobre el espacio de candidatos para ese papel, buscando la persona que «se acerca más a continuar» la existencia que he tenido hasta este momento. Especificar la función de distancia es, desde luego, esencial, y Nozick señala que las personas que ponen distintos énfasis en los aspectos definitorios de la personalidad pueden hacer elecciones distintas. En muchos casos, la idea intuitiva de quién «se acerca más a continuar» mi persona es adecuada, pero se pueden construir algunos ejemplos artificiales, pero desconcertantes. Imaginemos si no el caso del mal funcionamiento de un transportador que produce dos copias idénticas de mí en el destino. ¿Qué colección de partículas es «realmente» yo? En este caso, Nozick sugiere que sin un único continuador más cercano, podría dejar de existir. Sin embargo, como yo me siento cómodo con minimizaciones no únicas de funciones de distancia, mi perspectiva es que ambas copias son yo mismo. Para la idea de «yo» que utilizo en este capítulo, la idea intuitiva de la identidad personal coincide con la idea de Nozick, puesto que las diversas colecciones de partículas que intuitivamente llamaríamos, por ejemplo, Brian Greene durante toda mi vida son desde luego los continuadores más cercanos. Véase Robert Nozick, *Philosophical Explanations*, Belknap Press, Cambridge, MA, 1983, pp. 29-70. <<

[46] Una pregunta que esta sección suscita es si debemos cargar con las consecuencias de comportamientos que los conciudadanos o la sociedad consideran inaceptables. Los filósofos llevan mucho tiempo debatiendo preguntas en la frontera entre el libre albedrío, la responsabilidad moral y el papel del castigo. Son cuestiones complejas y espinosas. En pocas palabras, he aquí mi punto de vista. Por las mismas razones argüidas en el capítulo, nuestras acciones, buenas o malas, son responsabilidad de cada uno, incluso si no hay libre albedrío. Cada persona es sus partículas, y si sus partículas hacen algo incorrecto, esa persona ha hecho algo incorrecto. La cuestión central, pues, gira en torno a las consecuencias. Dejando de lado el hecho de que las consecuencias de las acciones tampoco son producto del libre albedrío, la pregunta es si esa persona debe sufrir un castigo. La única respuesta que me parece coherente, o, a decir verdad, el único principio de respuesta que a mí me parece coherente, es que el castigo debería fundamentarse en su capacidad para proteger los intereses sociales, lo que incluye disuadir la comisión de casos futuros de comportamiento inaceptable. Insisto en que el libre albedrío es compatible con el aprendizaje; el robot aspirador aprende igual que aprenden las personas. Las experiencias de hoy están causalmente relacionadas con las acciones de mañana. Así que si el castigo impide o disuade a esa persona y otras de realizar en el futuro acciones inaceptables, el castigo habrá guiado a la sociedad hacia un resultado más satisfactorio. Consideraciones parecidas son relevantes para los «casos de prueba» que suelen plantearse en estas discusiones en los que los comportamientos inaceptables surgen en circunstancias extenuantes (tumores cerebrales, coerción, esquizofrenia, implantes neuronales controlados por malvados alienígenas y otros por el estilo) que podría parecer que exoneran de responsabilidad a quien los perpetra. Lo que se sigue de lo comentado antes y de la discusión en el capítulo es que esos individuos son responsables de sus acciones. Sus partículas «hicieron» cosas inaceptables. Y «son» sus partículas. Sin embargo, en función de los detalles exactos de cada situación, debido a las circunstancias extenuantes, es probable que el castigo no rinda ningún beneficio. Si el comportamiento inaceptable se debía a un tumor cerebral, la sanción probablemente no pueda hacer nada para impedir un comportamiento parecido causado por circunstancias parecidas en el futuro. Y si podemos extirpar el tumor, el sujeto en cuestión deja de ser una amenaza,

de modo que la condena no ofrecería mayor protección a la sociedad. En resumen, el castigo debe servir a un propósito pragmático. <<

[1] Alice Calaprice (ed.), *The New Quotable Einstein*, Princeton University Press, Princeton, 2005, p. 149 [hay trad. cast.: *Albert Einstein: el libro definitivo de citas*, Plataforma, Barcelona, 2014]. <<

[2] Max Wertheimer, *Productive Thinking*, ed. ampliada, Harper and Brothers, Nueva York, 1959, p. 228 [hay trad. cast.: *El pensamiento productivo*, Paidós, Barcelona, 1991]. <<

[3] Ludwig Wittgenstein, *Tractatus Logico-Philosophicus*, Harcourt, Brace & Company, Nueva York, 1922, p. 149 [hay trad. cast.: *Tratatus lógico-philosophicus*, Alianza, Madrid, 1997]. <<

[4] Toni Morrison, discurso de aceptación del premio Nobel, 7 de diciembre de 1993. <https://www.nobelprize.org/prizes/literature/1993/morrison/lecture/> **<<**

[5] En palabras de Darwin: «El hombre primitivo, o más bien algún antiguo progenitor del hombre, probablemente usase por primera vez su voz para producir verdaderas cadencias musicales, es decir, para cantar», y añade: «Esta capacidad se habría ejercido especialmente durante el cortejo sexual para expresar distintas emociones, como el amor, los celos o el triunfo, y habría servido para retar a sus rivales». Charles Darwin, *The Descent of Man*, D. Appleton and Company, Nueva York, 1871, p. 56 [hay trad. cast.: *El origen del hombre*, Crítica, Barcelona, 2009]. **<<**

[6] En la edición de abril de 1869 del *Quarterly Review*, Wallace, refiriéndose a las fuerzas que mueven la evolución («las leyes de la variación, la multiplicación y la supervivencia»), argumentó que, como se comenta en el capítulo, «debemos, pues, admitir la posibilidad de que durante el desarrollo de la raza humana una inteligencia superior haya guiado las mismas leyes hacia más nobles fines». Alfred Russel Wallace, «Sir Charles Lyell on geological climates and the origin of species», *Quarterly Review* 126 (1869), pp. 359-394. <<

[7] Joel S. Schwartz, «Darwin, Wallace, and the Descent of Man», *Journal of the History of Biology* 17, n.º 2 (1984), pp. 271-289. <<

[8] Charles Darwin, carta a Alfred Wallace, 27 de marzo de 1869. <https://www.darwinproject.ac.uk/letter/?docId=letters/DCP-LETT-6684.xml;query=child;brand=default> **<<**

[9] Dorothy L. Cheney y Robert M. Seyfarth, *How Monkeys See the World: Inside the Mind of Another Species*, University of Chicago Press, Chicago, 1992. Puede escucharse una grabación de estas llamadas de alarma en la web de la BBC: <https://www.bbc.co.uk/programmes/p016dgw1> **<<**

[10] Bertrand Russell, *Human Knowledge*, Routledge, Nueva York, 2009, pp. 57-58 [hay trad. cast.: *El conocimiento humano*, Folio, Barcelona, 2002]. <<

[11] R. Berwick y N. Chomsky, *Why Only Us?* MIT Press, Cambridge, MA, 2015 [hay trad. cast.: *¿Por qué solo nosotros? Evolución y lenguaje*, Kairós, Barcelona, 2016]. Aunque hay quien ha cuestionado si la necesidad de cambio biológico relativamente rápido de esta teoría entra en conflicto con la teoría de la evolución, Chomsky argumenta que encaja perfectamente en la moderna teoría neodarwiniana que contempla episodios, como la formación del ojo, que se desvían de la perspectiva tradicional según la cual todo en la evolución es gradual y lento. <<

[12] S. Pinker y P. Bloom, «Natural language and natural selection», *Behavioral and Brain Sciences* 13, n.º 4 (1990): pp. 707-784; Steven Pinker, *The Language Instinct*, W. Morrow and Co., Nueva York, 1994 [hay trad. cast.: *El instinto del lenguaje*, Alianza, Madrid, 1996]; Steven Pinker, «Language as an adaptation to the cognitive niche», en S. Kirby y M. Christiansen (eds.), *Language Evolution: States of the Art*, Oxford University Press, Nueva York, 2003, pp. 16-37. <<

[13] Por ejemplo, tal como el lingüista y psicólogo del desarrollo Michael Tomasello ha observado: «Desde luego que todos los lenguajes del mundo tienen cosas en común…Pero eso que comparten no procede de una gramática universal, sino de aspectos universales en los humanos relativos a la cognición, la interacción social y el procesamiento de la información, la mayoría de los cuales ya existían en los humanos antes de que surgiera nada parecido a los modernos lenguajes». Michael Tomasello, «Universal Grammar Is Dead», *Behavioral and Brain Sciences* 32, n.º 5 (octubre de 2009), pp. 470-471. <<

[14] Simon E. Fisher, Faraneh Vargha-Khadem, Kate E. Watkins, Anthony P. Monaco y Marcus E. Pembrey, «Localisation of a gene implicated in a severe speech and language disorder», *Nature Genetics* 18 (1998), pp. 168-170. C. S. L. Lai *et al.*, «A novel forkhead-domain gene is mutated in a severe speech and language disorder», *Nature* 413 (2001), pp. 519-523. <<

[15] Johannes Krause, Carles Lalueza-Fox, Ludovic Orlando *et al.*, «The Derived FOXP2 Variant of Modern Humans Was Shared with Neandertals», *Current Biology* 17 (2007), pp. 1908-1912. <<

[16] Fernando L. Mendez *et al.*, «The Divergence of Neandertal and Modern Human Y Chromosomes», *American Journal of Human Genetics* 98, n.º 4 (2016), pp. 728-734. <<

[17] Guy Deutscher, *The Unfolding of Language: An Evolutionary Tour of Mankind's Greatest Invention*, Henry Holt and Company, Nueva York, 2005, p. 15. <<

[18] Dean Falk, «Prelinguistic evolution in early hominins: Whence motherese?», *Behavioral and Brain Sciences* 27 (2004), pp. 491-541; Dean Falk, *Finding Our Tongues: Mothers, Infants and the Origins of Language,* Basic Books, Nueva York, 2009. <<

[19] R. I. M. Dunbar, «Gossip in Evolutionary Perspective», *Review of General Psychology* 8, n.º 2 (2004), pp. 100-110; Robin Dunbar, *Grooming, Gossip, and the Evolution of Language*, Harvard University Press, Cambridge, MA, 1997. <<

[20] N. Emler, «The Truth About Gossip», *Social Psychology Section Newsletter* 27 (1992), pp. 23-37; R. I. M. Dunbar, N. D. C. Duncan y A. Marriott, «Human Conversational Behavior», *Human Nature* 8, n.º 3 (1997), pp. 231-246. <<

[21] Daniel Dor, *The Instruction of Imagination*, Oxford University Press, Oxford, 2015. <<

[22] Sobre el papel del fuego y la cocción de los alimentos, véase Richard Wrangha, *Catching Fire: How Cooking Made Us Human*, Basic Books, Nueva York, 2009; sobre el cuidado en grupo de los jóvenes, véase Sarah Hrdy, *Mothers and Others, The Evolutionary Origins of Mutual Understanding*, Belknap Press, Cambridge, MA, 2009; sobre el aprendizaje y la cooperación, véase Kim Sterelny, *The Evolved Apprentice: How Evolution Made Humans Unique*, MIT Press, Cambridge, MA, 2012. **<<**

[23] R. Berwick y N. Chomsky, *Why Only Us?* MIT Press, Cambridge, MA, 2015, capítulo 2 [hay trad. cast.: *¿Por qué solo nosotros? Evolución y lenguaje*, Kairós, Barcelona, 2016]. <<

[24] David Damrosch, *The Buried Book: The Loss and Rediscovery of the Great Epic of Gilgamesh*, Henry Holt and Company, Nueva York, 2007. <<

[25] Rafael Jiménez Zamudio (trad.), *El poema de Gilgamesh*, Cátedra, Madrid, 2015, pp. 256-257. <<

[26] Para una introducción a la perspectiva y principios de la psicología evolutiva, véase John Tooby y Leda Cosmides, «The Psychological Foundations of Culture», en Jerome H. Barkow, Leda Cosmides y John Toobyn (eds.), *The Adapted Mind: Evolutionary Psychology and the Generation of Culture*, Oxford University Press, Oxford, 1992, pp. 19-136; David Buss, *Evolutionary Psychology: The New Science of the Mind*, Allyn & Bacon, Boston, 2012. **<<**

[27] S. J. Gould y R. C. Lewontin, «The Spandrels of San Marco and the Panglossian Paradigm: A Critique of the Adaptationist Programme», *Proceedings of the Royal Society B* 205, n.º 1161 (21 de septiembre de 1979), pp. 581-598. <<

[28] Steven Pinker, *How the Mind Works*, W. W. Norton, Nueva York, 1997, p. 530 [hay trad. cast.: *Cómo funciona la mente*, Destino, Barcelona, 2007]; Brian Boyd, *On the Origin of Stories*, Belknap Press, Cambridge, MA, 2010; Brian Boyd, «The evolution of stories: from mimesis to language, from fact to fiction», WIREs *Cognitive Science* 9 (2018), 1444-1446. <<

[29] Patrick Colm Hogan, *The Mind and Its Stories*, Cambridge University Press, Cambridge, 2003; Lisa Zunshine, *Why We Read Fiction: Theory of Mind and the Novel*, Ohio State University Press, Columbus, 2006. <<

[30] Jonathan Gottschall, *The Storytelling Animal, Mariner Books,* Houghton Mifflin Harcourt, Boston y Nueva York, 2013, p. 63. <<

[31] Keith Oatley, «Why fiction may be twice as true as fact», *Review of General Psychology* 3 (1999), pp. 101-117. <<

[32] Para un relato absorbente sobre las investigaciones de Jouvet, véase Barbara E. Jones, «The mysteries of sleep and waking unveiled by Michel Jouvet», *Sleep Medicine* 49 (2018), pp. 14-19; Isabelle Arnulf, Colette Buda y Jean-Pierre Sastre, «Michel Jouvet: An explorer of dreams and a great storyteller», *Sleep Medicine* 49 (2018), pp. 4-9. <<

[33] Kenway Louie y Matthew A. Wilson, «Temporally Structured Replay of Awake Hippocampal Ensemble Activity During Rapid Eye Movement Sleep», *Neuron* 29 (2001), pp. 145-156. <<

[34] Las narraciones extravagantes que solemos asociar a los sueños violan las leyes físicas, la progresión lógica y la coherencia interna, y podrían sugerirnos que el acto de soñar tiene poca relevancia para nuestras interacciones en el mundo real. Sin embargo, la prevalencia de esos extraños sueños podría ser mucho menor de lo que una evaluación circunstancial nos lleva a pensar. Es posible que una parte sustancial de nuestras ensoñaciones sea de contenido realista. Antti Revonsuo, Jarno Tuominen y Katja Valli, «The Avatars in the Machine-Dreaming as a Simulation of Social Reality», *Open MIND* (2015), pp. 1-28; Serena Scarpelli, Chiara Bartolacci, Aurora D'Atri *et al.*, «The Functional Role of Dreaming in Emotional Processes», *Frontiers in Psychology* 10 (marzo de 2019), p. 459. <<

[35] Alfred North Whitehead, *Science and the Modern World*, Free Press, Nueva York, 1953, p. 10. <<

[36] Joyce Carol Oates, «Literature as Pleasure, Pleasure as Literature», *Narrative*. <https://www.narrativemagazine.com/issues/stories-week-2015-2016/story-week/literature-pleasure-pleasure-literature-joyce-carol-oates> **<<**

[37] Jerome Bruner, «The Narrative Construction of Reality», *Critical Inquiry* 18, n.º 1 (otoño de 1991), pp. 1-21. <<

[38] Jerome Bruner, *Making Stories: Law, Literature, Life*, Farrar, Straus and Giroux, Nueva York, 2002, p. 16. <<

[39] Brian Boyd, «The evolution of stories: from mimesis to language, from fact to fiction», *WIREs Cognitive Science* 9 (2018), pp. 7-8, e1444. <<

[40] John Tooby y Leda Cosmides, «Does Beauty Build Adapted Minds? Toward an Evolutionary Theory of Aesthetics, Fiction and the Arts», *SubStance* 30 (1-2), n.º 94-95 (2001), pp. 6-27. <<

[41] Ernest Becker, *The Denial of Death*, Free Press, 1973, p. 97 [hay trad. cast.: *La negación de la muerte*, Kairós, Barcelona, 2003]. <<

[42] Joseph Campbell, *The Hero with a Thousand Faces*, New World Library, Novato, CA, 2008, p. 23 [hay trad. cast.: *El héroe de las mil caras: psicoanálisis del mito*, FCE, Madrid, 2003]. <<

[43] Michael Witzel, *The Origins of the World’s Mythologies*, Oxford University Press, Nueva York, 2012. <<

[44] Karen Armstrong, *A Short History of Myth*, The Text Publishing Company, Melbourne, 2005, p. 3 [hay trad. cast.: *Breve historia del mito*, Salamandra, Barcelona, 2005]. <<

[45] Marguerite Yourcenar, *Oriental Tales*, Farrar, Straus and Giroux, Nueva York, 1985 [hay trad. cast.: *Cuentos orientales*, Alfaguara, Barcelona, 1991]. <<

[46] Scott Leonard y Michael McClure, *Myth and Knowing*, McGraw-Hill Higher Education, Nueva York, 2004, pp. 283-301. <<

[47] Michael Witzel, *The Origins of the World's Mythologies*, Oxford University Press, Nueva York, 2012, p. 79. <<

[48] Dan Sperber, *Rethinking Symbolism*, Cambridge University Press, Cambridge, 1975 [hay trad. cast.: *El simbolismo en general*, Anthropos, Barcelona, 1988]; Dan Sperber, *Explaining Culture: A Naturalistic Approach*, Blackwell Publishers Ltd., Oxford, 1996 [hay trad. cast.: *Explicar la cultura: un enfoque naturalista*, Morata, Madrid, 2005]. <<

[49] Pascal Boyer, «Functional Origins of Religious Concepts: Ontological and Strategic Selection in Evolved Minds», *Journal of the Royal Anthropological Institute* 6, n.º 2 (junio de 2000), pp. 195-214. Véase también: M. Zuckerman, «Sensation seeking: A comparative approach to a human trait», *Behavioral and Brain Sciences* 7 (1984), pp. 413-471. <<

[50] Bertrand Russell remarcó el papel del lenguaje como facilitador del pensamiento, observando que «el lenguaje sirve no solo para expresar pensamientos, sino también para hacer posibles pensamientos que sin él no existirían» (Bertrand Russell, *Human Knowledge*, Routledge, Nueva York, 2009, p. 58 [hay trad. cast.: *El conocimiento humano*, Folio, Barcelona, 2002]). También describió de qué modo ciertos «pensamientos bastante elaborados» requieren de las palabras, y a modo de ejemplo nos hace notar la aparente imposibilidad de tener, sin lenguaje, un «pensamiento que se corresponda remotamente a la afirmación «la razón entre la circunferencia y el diámetro de un círculo es aproximadamente 3,14159». Constructos menos precisos pero que escapan a los límites de la experiencia, como árboles parlantes, nubes llorosas o guijarros alegres, se prestan a encarnaciones sin palabras en la mente humana, pero la naturaleza combinatoria y jerárquica del lenguaje es especialmente apta para crearlos. Daniel Dennett ha subrayado el papel que desempeña el lenguaje en la capacidad humana para inventar uniones de cualidades que individualmente existen en la realidad, pero que combinadas nos llevan al ámbito de la fantasía (Daniel Dennett, *Breaking the Spell: Religion as a Natural Phenomenon*, Penguin Publishing Group, Nueva York, 2006, p. 121 [hay trad. cast.: *Romper el hechizo: la religión como un fenómeno natural*, Katz, Madrid, 2007]). Tal como discutiremos en el capítulo 8, ciertos tipos de arte se prestan especialmente bien a facilitar el flujo de ideas en la otra dirección: de los pensamientos articulados en palabras a los sentimientos experienciales libres de lenguaje. <<

[51] Justin L. Barrett, *Why Would Anyone Believe in God?*, AltaMira, Lanham, MD, 2004; Stewart Guthrie, *Faces in the Clouds: A New Theory of Religion*, Oxford University Press, Nueva York, 1993. <<

[1] La excavación del yacimiento de Qafzeh comenzó en 1934 de la mano del arqueólogo francés René Neuville, y la continuó un equipo liderado por el antropólogo Bernard Vandermeersch. En palabras de Vandermeersch y de su equipo, la disposición del enterramiento de Qafzeh 11 «atestigua un ofrecimiento funerario y no una incorporación accidental. Todas estas observaciones apoyan firmemente la interpretación de un enterramiento deliberado y ceremonial». Véase Hélène Coqueugniot *et al.*, «Earliest cranio-encephalic trauma from the Levantine Middle Palaeolithic: 3D reappraisal of the Qafzeh 11 skull, consequences of pediatric brain damage on individual life condition and social care», *PloS One* 9 (23 de julio de 2014), 7 e102822. <<

[2] Erik Trinkaus, Alexandra Buzhilova, Maria Mednikova y Maria Dobrovolskaya, *The People of Sunghir: Burials, Bodies and Behavior in the Earlier Upper Paleolithic*, Oxford University Press, Nueva York, 2014. <<

[3] Edward Burnett Tylor, *Primitive Culture*, vol. 2, John Murray, Londres, 1873; reimpreso por Dover, 2016, p. 24 [hay trad. cast.: *Cultura primitiva*, Ayuso, Madrid, 1977]. <<

[4] Mathias Georg Guenther, *Tricksters and Trancers: Bushman Religion and Society*, Indiana University Press, Bloomington, IN, 1999, pp. 180-198. <<

[5] Peter J. Ucko y Andrée Rosenfeld, *Paleolithic Cave Art*, McGraw-Hill, Nueva York, 1967, pp. 117-123 y 165-174. <<

[6] David Lewis-Williams, *The Mind in the Cave: Consciousness and the Origins of Art*, Thames & Hudson, 2002, p. 11 [hay trad. cast.: *La mente en la caverna: la conciencia y los orígenes del arte*, Akal, Tras Cantos, Madrid, 2011]. Aunque muchas obras se crearon también sobre superficies más accesibles, la existencia de un número sustancial de obras que presentaban dificultades considerables para su ejecución confiere relevancia a esta perspectiva. <<

[7] Salomon Reinach, *Cults, Myths and Religions*, trad. Elizabeth Frost, David Nutt, Lodres, 1912, pp. 124-138. <<

[8] La proposición ganó amplia aceptación, pero el posterior descubrimiento de discordancias entre los animales excavados en las inmediaciones de varias cavernas y los representados en las paredes de esas mismas cuevas planteó algunas dudas. Si lo que uno pretende es tener más suerte en la caza del bisonte, pintará un bisonte. O al menos eso cabe pensar. Pero los datos no respaldan esa expectativa. Véase Jean Clottes, *What Is Paleolithic Art? Cave Paintings and the Dawn of Human Creativity*, University of Chicago Press, Chicago, 2016. **<<**

[9] Benjamin Smith, comunicación personal, 13 de marzo de 2019. <<

[10] Pascal Boyer, *Religion Explained: The Evolutionary Origins of Religious Thought*, Basic Books, Nueva York, 2007, p. 2. <<

[11] Para una discusión detallada véanse, por ejemplo, Jerome H. Barkow, Leda Cosmide y John Tooby (eds.), *The Adapted Mind: Evolutionary Psychology and the Generation of Culture*, Oxford University Press, Oxford, 1992; o David Buss, *Evolutionary Psychology: The New Science of Mind*, Allyn & Bacon, Boston, 2012. <<

[12] Otras aportaciones accesibles sobre la ciencia cognitiva de la religión son, por ejemplo, Justin L. Barrett, *Why Would Anyone Believe in God?* AltaMira Press, Lanham, MD, 2004; Scott Atran, *In Gods We Trust: The Evolutionary Landscape of Religion*, Oxford University Press, Oxford, 2002; Todd Tremlin, *Minds and Gods: The Cognitive Foundations of Religion*, Oxford University Press, Oxford, 2006. <<

[13] Pascal Boyer, *Religion Explained: The Evolutionary Origins of Religious Thought*, Basic Books, Nueva York, 2007, pp. 46-47; Daniel Dennett, *Breaking the Spell: Religion as a Natural Phenomenon,* Penguin Books, Nueva York, 2006, pp. 122-123 [hay trad. cast.: *Romper el hechizo: la religión como un fenómeno natural*, Katz, Madrid, 2007]; Richard Dawkins, *The God Delusion*, Houghton Mifflin Harcourt, Nueva York, 2006, pp. 230-233 [hay trad. cast.: *El espejismo de Dios*, Espasa, Barcelona, 2009]. <<

[14] Descrita originalmente por Darwin, la selección de parentesco (o eficacia biológica inclusiva) fue desarrollada por R. A. Fisher, *The Genetical Theory of Natural Selection*, Clarendon Press, Oxford, 1930; J. B. S. Haldane, *The Causes of Evolution*, Longmans, Green & Co., Londres, 1932; y W. D. Hamilton, «The Genetical Evolution of Social Behaviour», *Journal of Theoretical Biology* 7, n.º 1 (1964), pp. 1-16. Más recientemente, la utilidad de la eficacia biológica inclusiva para entender procesos evolutivos ha sido desafiada por M. A. Nowak, C. E. Tarnita y E. O. Wilson, «The evolution of eusociality», *Nature* 466 (2010), pp. 1057-1062, con una respuesta crítica firmada por 136 investigadores: P. Abbot, J. Abe, J. Alcock *et al.*, «Inclusive fitness theory and eusociality», *Nature* 471 (2010), pp. E1-E4. <<

[15] David Sloan Wilson, *Does Altruism Exist? Culture, Genes and the Welfare of Others*, Yale University Press, New Haven, 2015; David Sloan Wilson, *Darwin’s Cathedral: Evolution, Religion and the Nature of Society*, University of Chicago Press, Chicago, 2002. **<<**

[16] Como ejemplo, véase Steven Pinker en «The Believing Brain», programa público del World Science Festival, Nueva York, Gerald Lynch Theatre, 2 de junio de 2018, <https://www.worldsciencefestival.com/videos/believing-brain-evolution-neuroscience-spiritual-instinct/46:50-49:16>. **<<**

[17] Charles Darwin, *The Descent of Man and Selection in Relation to Sex*, D. Appleton and Company, Nueva York, 1871, p. 84. Kindle [hay trad. cast.: *El origen del hombre*, Crítica, Barcelona, 2009]. El comentario de Darwin apunta a un debate de largo recorrido en la teoría de la evolución acerca del proceso de selección de grupo. La teoría evolutiva estándar se basa en la actuación de la selección natural sobre organismos individuales: aquellos que resulten ser más aptos para sobrevivir y reproducirse tendrán más éxito en la transmisión del material genético a su progenie. La selección de grupo es una forma parecida, pero que actuaría sobre grupos enteros: aquellos grupos que sean más aptos para sobrevivir (como grupos enteros de individuos) y reproducirse (en el sentido de aumentar de tamaño y dividirse en nuevos grupos) tendrán más éxito en la transmisión de rasgos dominantes a grupos posteriores. (El comentario de Darwin se centra en individuos cooperadores que contribuyen al éxito del grupo medido como un aumento de su población, no por la producción por el grupo de un mayor número de grupos del mismo tamaño, pero en cualquier caso se basa en la interacción fundamental entre los comportamientos beneficiosos para el individuo y los beneficiosos para el grupo). No hay controversia sobre si la selección de grupo puede producirse en principio. La controversia es sobre si ocurre en la práctica. Es una cuestión de escalas: la expectativa general es que la escala de tiempo típica durante la cual se reproduce o muere un individuo es mucho más corta que las correspondientes escalas temporales durante las cuales un grupo se divide o se disuelve. Y si este es el caso, tal como defienden los críticos, entonces la selección de grupo sería demasiado lenta como para revestir la menor importancia. En respuesta a esta crítica, David Sloan Wilson, un viejo defensor de la selección de grupo (en una forma más generalizada conocida como selección multinivel), ha argumentado que buena parte del debate se reduce a métodos de recuento (formas de hacer la partición de la población entera) que son diferentes, pero en último término equivalentes, y que, por consiguiente, la cuestión es menos polémica de lo que sugieren los actuales desacuerdos (véase David Sloan Wilson, *Does Altruism Exist? Culture, Genes and the Welfare of Others*, Yale University Press, New Haven, 2015, pp. 31-46). <<

[18] La importancia de la base emocional del compromiso religioso se examina en R. Sosis, «Religion and intra-group cooperation: Preliminary results of a comparative analysis of utopian communities», *Cross-Cultural Research* 34 (2000), pp. 70-87; R. Sosis y C. Alcorta, «Signaling, solidarity, and the sacred: The evolution of religious behavior», *Evolutionary Anthropology* 12 (2003), pp. 264-274. <<

[19] Robert Axelrod y William D. Hamilton, «The Evolution of Cooperation», *Science* 211 (marzo de 1981), pp. 1390-1396; Robert Axelrod, *The Evolution of Cooperation*, ed. rev. Perseus Books Group, 2006 [hay trad. cast. de la ed. original: *La evolución de la cooperación: el dilema del prisionero y la teoría de juegos*, Alianza, Madrid, 1996]. <<

[20] Jesse Bering, *The Belief Instinct*, W. W. Norton, Nueva York, 2011 [hay trad. cast.: *El instinto de creer: la psicología de la fe, el destino y el significado de la vida*, Paidós, Barcelona, 2012]. <<

[21] Sheldon Solomon, Jeff Greenberg y Tom Pyszczynski, *The Worm at the Core: On the Role of Death in Life*, Random House Publishing Group, Nueva York, 2015, p. 122. <<

[22] Abram Rosenblatt, Jeff Greenberg, Sheldon Solomon *et al.*, «Evidence for Terror Management Theory I: The Effects of Mortality Salience on Reactions to Those Who Violate or Uphold Cultural Values», *Journal of Personality and Social Psychology* 57 (1989), pp. 681-690. Para una revisión, véase Sheldon Solomon, Jeff Greenberg y Tom Pyszczynski, «Tales from the Crypt: On the Role of Death in Life», *Zygon* 33, n.º 1 (1998), pp. 9-43. <<

[23] Tom Pyszczynski, Sheldon Solomon y Jeff Greenberg, «Thirty Years of Terror Management Theory», *Advances in Experimental Social Psychology* 52 (2015), pp. 1-70. <<

[24] Pascal Boyer, *Religion Explained: The Evolutionary Origins of Religious Thought*, Basic Books, Nueva York, 2007, p. 20. <<

[25] William James, *The Varieties of Religious Experience: A Study in Human Nature*, Longmans, Green, and Co., Nueva York, 1905, p. 485 [hay trad. cast.: *Las variedades de la experiencia religiosa: estudio de la naturaleza humana*, Península, Barcelona, 2002]. **<<**

[26] Stephen Jay Gould, *The Richness of Life: The Essential Stephen Jay Gould*, W. W. Norton, Nueva York, 2006, pp. 232-233. <<

[27] Stephen J. Gould, en *Conversations About the End of Time*, Fromm International, Nueva York, 1999. Para un estudio sobre el peso de la conciencia de la mortalidad sobre la creencia en entidades sobrenaturales, véase, por ejemplo, A. Norenzayan e I. G. Hansen, «Belief in supernatural agents in the face of death», *Personality and Social Psychology Bulletin* 32 (2006), pp. 174-187. <<

[28] Karl Jaspers, *The Origin and Goal of History*, Routledge, Abingdon, 2010, p. 2 [hay trad. cast.: *Origen y meta de la historia*, Acantilado, Barcelona, 2017]. <<

[29] Wendy Doniger (trad.), *The Rig Veda*, Penguin Classics, Nueva York, 2005, pp. 25-26 [hay trad. cast.: *Himnos del Rig Veda (selección)*, Las Cuarenta, Buenos Aires, Argentina, 2018]. <<

[30] Su Santidad el dalái lama, Houston, Texas, 21 de septiembre de 2005. No he logrado encontrar una transcripción de nuestras conversación, de modo que la cita no es literal pero sí aproximada. <<

[31] Como ocurre con las raíces históricas de las principales religiones, los estudiosos debaten sobre el momento exacto en que se escribieron los distintos textos, cuándo alcanzaron su forma canónica, etc. Las fechas que cito son compatibles con algunas opiniones eruditas, pero como no hay acuerdo general, deben considerarse solamente como una aproximación. <<

[32] David Buss, *Evolutionary Psychology: The New Science of Mind*, Allyn & Bacon, 2012, pp. 90-95, 205-206 y 405-409. <<

[33] Para una discusión profunda, accesible y entretenida sobre la creencia y los diversos factores que la afectan, véase Michael Shermer, *The Believing Brain: From Ghosts and Gods to Politics and Conspiracies*, St. Martin's Griffin, Nueva York, 2011. Aunque la influencia que pueda tener la emoción sobre la creencia pueda parecer evidente, hasta hace poco la indagación académica tendía a enfatizar la influencia de la creencia sobre la emoción, un aspecto subrayado en N. Frijda, A. S. R. Manstead y S. Bem, «The influence of emotions on belief», en N. Frijda, A. Manstead y S. Bem (eds.), *Emotions and Beliefs: How Feelings Influence Thoughts* (Studies in Emotion and Social Interaction), Cambridge University Press, Cambridge, 2000, pp. 1-9. Puede encontrarse una descripción de los estudios sobre el peso de la emoción en el establecimiento de creencias en contextos en los que antes no había ninguna, así como sobre la influencia de la emoción sobre la voluntad de cambiar creencias, en N. Frijda y B. Mesquita, «Beliefs through emotions», en N. Frijda, A. Manstead y S. Bem (eds.), *Emotions and Beliefs: How Feelings Influence Thoughts* (Studies in Emotion and Social Interaction), Cambridge University Press, Cambridge, 2000, pp. 45-77. <<

[34] Pascal Boyer, *Religion Explained: The Evolutionary Origins of Religious Thought*, Basic Books, Nueva York, 2007, p. 303. **<<**

[35] Karen Armstrong, *A Short History of Myth*, The Text Publishing Company, Melbourne, 2005, p. 57 [hay trad. cast.: *Breve historia del mito*, Salamandra, Barcelona, 2005]. <<

[36] *Ibid.* <<

[37] Guy Deutscher, *The Unfolding of Language: An Evolutionary Tour of Mankind's Greatest Invention*, Henry Holt and Company, Nueva York, 2005. <<

[38] William James, *The Varieties of Religious Experience: A Study in Human Nature*, Longmans, Green, and Co., Nueva York, 1905, p. 498 [hay trad. cast.: *Las variedades de la experiencia religiosa: estudio de la naturaleza humana*, Península, Barcelona, 2002]. <<

[39] *Ibid*, pp. 506-507. <<

[1] Howard Chandler Robbins Landon, *Beethoven: A Documentary Study*, Macmillan Publishing Co., Inc., Nueva York, 1970, p. 181. <<

[2] Friedrich Nietzsche, *Twilight of the Idols*, trad. Duncan Large, Oxford University Press, Oxford, 1998, reimpresión de 2008, p. 9 [hay trad. cast.: *El crepúsculo de los ídolos*, Alianza, Madrid, 1987]. <<

[3] George Bernard Shaw, *Back to Methuselah*, CreateSpace Independent Publishing Platform, Scotts Valley, CA, 2012, p. 277. <<

[4] David Sheff, «Keith Haring, An Intimate Conversation», *Rolling Stone* 589 (agosto de 1989), p. 47. <<

[5] Josephine C. A. Joordens *et al.*, «*Homo erectus* at Trinil on Java used shells for tool production and engraving», *Nature* 518 (12 de febrero de 2015), pp. 228-231. <<

[6] Para ser precisos, lo que importa es que los genes de un individuo se transmitan a la siguiente generación, un fin que puede conseguirse teniendo descendencia propia o favoreciendo que la tengan otros individuos con los que uno comparte una porción sustancial de sus genes. <<

[7] El ritual de cortejo del saltarín barbiblanco (*Manacus manacus*) está descrito con todo detalle en Richard Prum, *The Evolution of Beauty: How Darwin's Forgotten Theory on Mate Choice Shapes the Animal World and Us*, Doubleday, Nueva York, 2017, pp. 1544-1545, Kindle [hay trad. cast.: *La evolución de la belleza: de cómo la teoría olvidada de Darwin explica la atracción sexual y cómo los animales y los humanos eligen pareja*, Ático de los Libros, Barcelona, 2019]. Sobre las exhibiciones de luces y la elección de pareja en las luciérnagas, véase la revisión de S. M. Lewis y C. K. Cratsley, «Flash signal evolution, mate choice, and predation in fireflies», *Annual Review of Entomology* 53 (2008), pp. 293-321. Las construcciones de los pergoleros o aves de emparrado [familia ptilonorrínquidos] están descritas e ilustradas en Peter Rowland, *Bowerbirds*, CSIRO Publishing, Collingwood, Australia, 2008, especialmente pp. 40-47. <<

[8] La resistencia a la selección sexual se debía también, en parte, a que cedía el poder selectivo a hembras exigentes, una propuesta que repugnaba a los biólogos victorianos, casi todos ellos hombres. Véase, por ejemplo, H. Cronin, *The Ant and the Peacock: Altruism and Sexual Selection from Darwin to Today*, Cambridge University Press, Cambridge, 1991. Nótese también que hay ejemplos de especies en los que eligen los machos, y otras en las que lo hacen tanto machos como hembras. <<

[9] Charles Darwin, *The Descent of Man and Selection in Relation to Sex,* ed. ilus., D. Appleton and Company, Nueva York, 1871, p. 59 [hay trad. cast.: *El origen del hombre*, Crítica, Barcelona, 2009]. <<

[10] Wallace ofrecía explicaciones alternativas de los ornamentos corporales de los machos, por ejemplo que estos poseían un exceso de «vigor» que, sin otra salida, se manifestaba como colores vivos, largas colas, prolongados cantos, etc. También argumentaba que los adornos corporales atractivos necesariamente debían estar correlacionados con la salud y la robustez y que, por consiguiente, ofrecían una indicación exterior de la eficacia biológica, con lo cual la selección sexual se convertía en un caso particular de la selección natural. Véase Alfred Russel Wallace, *Natural Selection and Tropical Nature*, Macmillan and Co., Londres, 1891. El ornitólogo Richard Prum sostiene que los investigadores han descartado injustificadamente las sensibilidades estéticas intrínsecas a favor de explicaciones adaptativas, una posición controvertida que expone en *The Evolution of Beauty: How Darwin's Forgotten Theory on Mate Choice Shapes the Animal World and Us*, Doubleday, Nueva York, 2017 [hay trad. cast.: *La evolución de la belleza: de cómo la teoría olvidada de Darwin explica la atracción sexual y cómo los animales y los humanos eligen pareja*, Ático de los Libros, Barcelona, 2019]. <<

[11] La asimetría entre machos y hembras en el ámbito de la estrategia reproductiva fue estudiada e iluminada por Robert Trivers en «Parental Investment and Sexual Selection», en Bernard G. Campbell (ed.), *Sexual Selection and the Descent of Man: The Darwinian Pivot*, Aldine Publishing Company, Chicago, 1972, pp. 136-179. <<

[12] Geoffrey Miller, *The Mating Mind: How Sexual Choice Shaped the Evolution of Human Nature*, Anchor, Nueva York, 2000; Denis Dutton, *The Art Instinct*, Bloomsbury Press, Nueva York, 2010 [hay trad. cast.: *El instinto del arte*, Paidós, Barcelona, 2010]. Su perspectiva está estrechamente relacionada con una propuesta anterior de Amotz Zahavi, el «principio del hándicap», que imagina que algunos animales anuncian su eficacia o aptitud biológica (*fitness*) mediante exhibiciones de aparente consumo conspicuo que pueden adoptar la forma de partes del cuerpo o comportamientos extravagantes. Un pavo real que se puede permitir el lujo de llevar una cola hermosa pero engorrosa da a sus posibles parejas garantías de fuerza y aptitud, puesto que los individuos más débiles no conseguirían sobrevivir con un rasgo tan extravagante que pone en peligro la supervivencia. La idea, pues, es que los primeros artistas humanos podrían haber sacado partido de la irrelevancia adaptativa de su arte para hacer análogas exhibiciones de fuerza y aptitud biológica, aprovechando así oportunidades para reproducirse y trasmitiendo a su descendencia la tendencia a usar el arte como medio para atraer parejas. Véase Amotz Zahavi, «Mate selection-A selection for a handicap», *Journal of Theoretical Biology* 53, n.º 1 (1975), pp. 205-214. <<

[13] Brian Boyd, «Evolutionary Theories of Art», en Jonathan Gottschall y David Sloan Wilson (eds.), *The Literary Animal: Evolution and the Nature of Narrative*, Northwestern University Press, Evanston, IL, 2005, p. 147.Las críticas a la selección natural como explicación de la actividad artística humana que se mencionan en este párrafo se han desarrollado en diversas publicaciones. He aquí una muestra. Si la selección natural es la explicación de las artes, ¿no esperaríamos que el arte fuese esencialmente una actividad masculina que se habría refinado para obtener sexo, es decir, una actividad practicada más vigorosamente por los machos en el apogeo de su impulso reproductor y dirigida de forma exclusiva a posibles parejas? (Brian Boyd, *On the Origin of Stories*, Belknap Press, Cambridge, 2010, p. 76; Ellen Dissanayake, *Art and Intimacy*, University of Washington Press, Seattle, 2000, p. 136). La inteligencia y la creatividad no son necesariamente indicadores fiables del estado físico, puesto que la combinación de destreza artística y debilidad física no es rara. (James R. Roney, «Likeable but Unlikely, a Review of the Mating Mind by Geoffrey Miller», *Psycoloquy* 13, n.º 10, 2002, artículo 5.) ¿Hay algún indicio de que las aventuras artísticas de los hombres proporcionasen una mejor manera de anunciar su aptitud biológica que otras actividades como alardear de conexiones sociales, hacer ostentación de la riqueza, ganar en los deportes u otros? (Stephen Davies, *The Artful Species: Aesthetics, Art, and Evolution*, Oxford University Press, Oxford, 2012, p. 125.) <<

[14] Steven Pinker, *How the Mind Works*, W. W. Norton, Nueva York, 1997, p. 525 [hay trad. cast.: *Cómo funciona la mente*, Destino, Barcelona, 2007]. <<

[15] Ellen Dissanayake, *Art and Intimacy: How the Arts Began*, University of Washington Press, Seattle, 2000, p. 94. <<

[16] Noël Carroll, «The Arts, Emotion, and Evolution», en Greg Currie, Matthew Kieran, Aaron Meskin y Jon Robson (eds.), *Aesthetics and the Sciences of Mind*, Oxford University Press, Oxford, 2014. <<

[17] Glenn Gould en Tim Page (ed.), *The Glenn Gould Reader*, Vintage Books, Nueva York, 1984, p. 240. <<

[18] Brian Boyd, *On the Origin of Stories*, Belknap Press, Cambridge, 2010, p. 125. <<

[19] Jane Hirshfield, *Nine Gates: Entering the Mind of Poetry*, Harper Perennial, Nueva York, 1998, p. 18. <<

[20] Saul Bellow, discurso de aceptación del premio Nobel, 12 de diciembre de 1976, en Sture Allén (ed.), *Nobel Lectures, Literature 1968-1980*, World Scientific Publishing Co., Singapur, 1993. <<

[21] Joseph Conrad, *The Nigger of the «Narcissus»*, Dover Publications, Inc., Mineola, NY, 1999, p. VI [hay trad. cast.: *El negro del «Narcissus»*, Alianza, Barcelona, 2006]. <<

[22] Las obras literarias en las que habitan estos personajes son, respectivamente, la *Odisea* (Homero), *Macbeth* (Shakespeare), *El guardián entre el centeno* (J. D. Salinger), *Matar un ruiseñor* (Harper Lee), *Madame Bovary* (Flaubert) y *El mago de Oz* (L. Frank Baum). (*N. del t.*) **<<**

[23] Yip Harburg, «Yip at the 92nd Street YM-YWHA, December 13, 1970», transcripción 1-10-3, p. 3, cintas 7-2-10 y 7-2-20. <<

[24] Yip Harburg, «E. Y. Harburg, Lecture at UCLA on Lyric Writing, February 3, 1977», transcripción, pp. 5-7, cinta 7-3-10. <<

[25] Marcel Proust, *Remembrance of Things Past*, vol. 3: *The Captive, The Fugitive, Time Regained*, Vintage, Nueva York, 1982, pp. 260 y 931 [hay trad. cast.: *En busca del tiempo perdido*, Alianza, Madrid, 2011]. <<

[26] *Ibid*, 260. <<

[27] George Bernard Shaw, *Back to Methuselah*, Create Space Independent Publishing Platform, Scotts Valley, CA, 2012, p. 278. <<

[28] Ellen Greene, «Sappho 58: Philosophical Reflections on Death and Aging», en Ellen Greene y Marilyn B. Skinner (eds.), *The New Sappho on Old Age: Textual and Philosophical Issues*, Hellenic Studies Series 38, Center for Hellenic Studies, Washington, DC, 2009; Ellen Greene (ed.), *Reading Sappho: Contemporary Approaches*, University of California Press, Berkeley, 1996. <<

[29] Joseph Wood Krutch, «Art, Magic, and Eternity», *Virginia Quarterly Review* 8, n.º 4, (otoño de 1932); <https://www.vqronline.org/essay/art-magic-and-eternity> **<<**

[30] Para una perspectiva alternativa (como en la nota 5 del capítulo 1), algunos autores sugieren que la ansiedad por la muerte y el impacto que la acompaña a través de la negación de la muerte son, tal como describe Ernest Becker, influencias modernas, espoleadas en buena medida por el aumento de la longevidad y el declive de la religión. Véase, por ejemplo, Philippe Ariès, *The Hour of Our Death*, trad. Helen Weaver, Alfred A. Knopf, Nueva York, 1981 [hay trad. cast.: *El hombre ante la muerte*, Taurus, Barcelona, 1992]. <<

[31] W. B. Yeats, *Collected Poems*, Macmillan Collector's Library Books, Nueva York, 2016, p. 267 [hay trad. cast.: *Poesía reunida*, Pre-Textos, Valencia, 2010]. <<

[32] Herman Melville, *Moby-Dick*, Wordsworth Classics, Hertfordshire, UK, 1993, p. 235 [hay trad. cast.: *Moby Dick o la ballena blanca*, Alfaguara, Barcelona, 1997]. <<

[33] Edgar Allan Poe, citado en J. Gerald Kennedy, *Poe, Death, and the Life of Writing*, Yale University Press, 1987, p. 48. <<

[34] Tennessee Williams, *Cat on a Hot Tin Roof*, New American Library, Nueva York, 1955, pp. 67-68 [hay trad. cast.: *Una gata sobre un tejado de zinc; Un análisis perfecto hecho por un loro*, Alba, Barcelona, 2007]. <<

[35] Fyodor Dostoevsky, *Crime and Punishment*, trad. Michael R. Katz, Liveright, Nueva York, 2017, p. 318 [hay trad. cast.: *Crimen y castigo*, Alianza, Madrid, 2018]. <<

[36] Sylvia Plath, *The Collected Poems*, edición de Ted Hughes, Harper Perennial, 1992, p. 255 [hay trad. cast.: *Antología*, Visor, Madrid, 2009]. **<<**

[37] Douglas Adams, *Life, the Universe and Everything*, Del Rey, Nueva York, 2005, pp. 4-5 [hay trad. cast.: *La vida, el universo y todo lo demás*, Anagrama, Barcelona, 2005]. <<

[38] Pablo Casals en el Festival Bach de Prades, 1950, citado en Paul Elie, *Reinventing Bach*, Farrar, Straus and Giroux, Nueva York, 2012, p. 447. <<

[39] Joseph Conrad, *The Nigger of the «Narcissus»*, Dover Publications, Inc., Mineola, NY, 1999, p. VI [hay trad. cast.: *El negro del «Narcissus»*, Alianza, Barcelona, 2006]. <<

[40] Ironía por semejanza con PhD (*Philosophiæ Doctor*), que es como se abrevia el título de doctor académico en los países anglosajones. (*N. del t.*) <<

[41] Helen Keller, carta a la New York Symphony Orchestra, 2 de febrero de 1924, archivos digitales de la Fundación Americana para la Ceguera, nombre de archivo: HK01-07_B114_F08_015_002.tif. <<

[1] Algunos pensadores destacados han sugerido que la evolución humana ya ha terminado. Por ejemplo, Stephen Jay Gould comentó que, desde el punto de vista de la biología, los humanos actuales son prácticamente idénticos a los que vivieron hace cincuenta mil años (Stephen Jay Gould, «The spice of life», *Leader to Leader* 15 [2000], pp. 14-19). Otros investigadores que han estudiado el genoma humano defienden lo contrario, que la tasa de evolución de los humanos se está acelerando (véase, por ejemplo, John Hawks, Eric T. Wang, Gregory M. Cochran *et al.*, «Recent acceleration of human adaptive evolution», *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104, n.º 52 [diciembre de 2007], pp. 20 753-20 758; Wenqing Fu, Timothy D. O’Connor, Goo Jun *et al.*, «Analysis of 6,515 exomes reveals the recent origin of most human protein-coding variants», *Nature* 493 [10 de enero de 2013], pp. 216-220). Estudios realizados en diversas poblaciones ofrecen pruebas de una evolución genética reciente. Entre los ejemplos se incluye la estatura de los hombres holandeses, cuyo excepcional incremento promedio podría reflejar los efectos de la selección sexual y natural (Gert Stulp, Louise Barrett, Felix C. Tropf y Melinda Mill, «Does natural selection favour taller stature among the tallest people on earth?», *Proceedings of the Royal Society* B 282, n.º 1806 [7 de mayo de 2015], 20150211) y algunas adaptaciones a entornos a gran altitud (Abigail Bigham *et al.*, «Identifying signatures of natural selection in Tibetan and Andean populations using dense genome scan data», *PLoS Genetics* 6, n.º 9 [9 de septiembre de 2010], e1001116). <<

[2] Choongwon Jeong y Anna Di Rienzo, «Adaptations to local environments in modern human populations», *Current Opinion in Genetics & Development* 29 (2014), pp. 1-8; Gert Stulp, Louise Barrett, Felix C. Tropf y Melinda Mill, «Does natural selection favour taller stature among the tallest people on earth?», *Proceedings of the Royal Society B* 282, n.º 1806 (7 de mayo de 2015), 20150211 (y véase nota 1 anterior). **<<**

[3] Una consideración circunspecta de esta suposición es la ofrecida en Steven Carlip, «Transient Observers and Variable Constants, or Repelling the Invasion of the Boltzmann's Brains», *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 06 (2007), 001. Nótese que una posible variación que tomaremos en consideración es que el valor de la energía oscura pueda cambiar. Como comentamos en este capítulo, no fue hasta finales de la década de 1990 cuando las observaciones astronómicas convencieron a la comunidad física de que la eliminación de la constante cosmológica por Einstein en 1931 («¡Fuera el término cosmológico!») fue prematura. Como prematuro fue etiquetar de «constante» la constante cosmológica. Es bastante probable que el valor del término cosmológico de Einstein varíe con el tiempo, una posibilidad que, como veremos, tiene profundas implicaciones para el futuro. <<

[4] Para una perspectiva diferente sobre el futuro de la inteligencia, véase David Deutsch, *The Beginning of Infinity*, Viking, Nueva York, 2011 [hay trad. cast.: *El comienzo del infinito: explicaciones que transforman el mundo*, Ediciones de Intervención Cultural, Vilassar de Dalt, 2012]. <<

[5] La escatología física (la física del futuro lejano) ha recibido menos atención que la física del pasado lejano. Aun así, se han hecho numerosos estudios. Una lista detallada de las referencias técnicas se encuentra en Milan M. Ćirković, «Resource Letter: PEs-1, Physical Eschatology», *American Journal of Physics* 71 (2003), p. 122. En la discusión que sigue, el artículo seminal de Freeman Dyson, «Time without end: Physics and biology in an open universe», *Reviews of Modern Physics* 51 (1979), pp. 447-460, ha ejercido una especial influencia, al igual que el artículo de Fred C. Adams y Gregory Laughlin, «A dying universe: The long-term fate and evolution of astrophysical objects», *Reviews of Modern Physics* 69 (1997), pp. 337-372, que desarrolló la cuestión más a fondo e incluye nuevos resultados sobre dinámica planetaria, estelar y galáctica que se discuten también en su excelente obra de divulgación *The Five Ages of the Universe: Inside the Physics of Eternity* (Free Press, Nueva York, 1999). La disciplina debe sus orígenes modernos al artículo de M. J. Rees, «The collapse of the universe: An eschatological study», *Observatory* 89 (1969), pp. 193-198, así como al artículo de Jamal N. Islam, «Possible Ultimate Fate of the Universe», *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society* 18 (marzo de 1977), pp. 3-8. <<

[6] I.-J. Sackmann, A. I. Boothroyd y K. E. Kraemer, «Our Sun. III. Present and Future», *Astrophysical Journal* 418 (1993), p. 457; Klaus-Peter Schroder y Robert C. Smith, «Distant future of the Sun and Earth revisited», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 386, n.º 1 (2008), pp. 155-163. <<

[7] El lector experto se habrá dado cuenta de que el principio de exclusión de Pauli habría desempeñado ya un papel en la evolución del Sol. Antes de que se inicie la fusión de helio en el núcleo de este, la densidad habría sido lo bastante alta como para que tomase relevancia la presión de degeneración de electrones que prevé el principio de exclusión. De hecho, la «espectacular pero breve erupción» que, en la descripción que ofrezco, marca la transición a la fusión de helio surge a causa de propiedades especiales del gas de electrones degenerados que puebla el núcleo estelar (el gas no se expande o enfría como respuesta al calor generado por el inicio de la fusión de helio, lo cual desencadena una colosal reacción nuclear, no muy distinta de la que se produce en una bomba de helio). <<

[8] Alan Lindsay Mackay, *The Harvest of a Quiet Eye: A Selection of Scientific Quotations*, Institute of Physics, Bristol, 1977, p. 117. <<

[9] El reconocimiento inicial del papel esencial del principio de exclusión de Pauli en la estructura de las enanas blancas se encuentra en R. H. Fowler, «On Dense Matter», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 87, n.º 2 (1926), pp. 114-122. El reconocimiento de la importante inclusión de los efectos relativísticos se realizó en Subrahmanyan Chandrasekhar, «The Maximum Mass of Ideal White Dwarfs», *Astrophysical Journal* 74 (1931), pp. 81-82. El resultado, conocido como límite de Chandrasekhar, muestra que la contracción de toda estrella con masa inferior a unas 1,4 veces la del Sol quedará igualmente frenada por la resistencia debida al principio de exclusión de Pauli. Trabajos posteriores revelaron que, en el caso de las estrellas más masivas, la fuerza de la contracción estelar puede empujar a los electrones a fundirse con protones formando neutrones. El proceso permite que las estrellas se contraigan todavía más, pero en algún momento los neutrones estarán tan densamente empaquetados que el principio de exclusión de Pauli volverá a cobrar relevancia, frenando una vez más la contracción. El resultado será una estrella de neutrones. <<

[10] Aunque por término medio las galaxias se están separando cada vez más, algunas están lo bastante próximas como para que su atracción gravitatoria mutua las lleve a acercarse. Como comentaremos más adelante, este es el caso de la Vía Láctea y la galaxia de Andrómeda. **<<**

[11] S. Perlmutter *et al.*, «Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae», *Astrophysical Journal* 517, n.º 2 (1999), p. 565; B. P. Schmidt *et al.*, «The High-Z Supernova Search: Measuring Cosmic Deceleration and Global Curvature of the Universe Using Type IA Supernovae», *Astrophysical Journal* 507 (1998), p. 46. <<

[12] Para ser rigurosos, todas las explicaciones de la expansión acelerada del espacio que se toman en serio apuntan a la gravedad como responsable, pero en términos muy generales lo hacen de dos maneras distintas. O bien el comportamiento de la fuerza de la gravedad a distancias cosmológicas difiere del que esperaríamos a partir de las descripciones de Einstein y Newton, o bien las fuentes de la gravedad difieren de lo que esperaríamos a partir del conocimiento convencional sobre la materia y la energía. Aunque ambos enfoques son factibles, el segundo se ha desarrollado y aplicado más ampliamente (para explicar no solo la aceleración de la expansión del espacio, sino también algunas observaciones detalladas sobre la radiación de fondo de microondas), y por ello es la aproximación que seguimos aquí. <<

[13] La densidad de la energía oscura es de aproximadamente 5×10^{-10} julios por metro cúbico, o unos 5×10^{-10} vatios-segundo por metro cúbico. Una bombilla de 100 vatios consume durante un segundo 2×10^{-11} veces la energía oscura contenida en un metro cúbico. Por consiguiente, esa energía puede mantener encendida una bombilla de 100 vatios durante unos 5×10^{-12} segundos, o cinco billonésimas de segundo. <<

[14] Si el valor de la energía oscura no cambia con el tiempo, entonces es idéntico a la constante cosmológica de Einstein, un apaño de último momento que el científico introdujo en sus cálculos en 1917 cuando se dio cuenta de que las ecuaciones de la relatividad general no lograban explicar la visión de consenso de que, a gran escala, el universo es estático. El desafío que esto planteaba para Einstein es que la estasis requiere equilibrio, pero la gravedad solo empuja en una dirección. Sin una fuerza compensatoria, un universo estático era imposible. Pero Einstein comprendió entonces que si insería un nuevo término en su ecuación (la constante cosmológica), la relatividad general permitía una gravedad repulsiva que compensaría la gravedad atractiva ordinaria y haría posible un universo estático. (Einstein no se percató de que este equilibrio era inestable: un pequeño cambio en el tamaño del universo estático, a mayor o a menor tamaño, rompería el equilibrio y conduciría a la expansión o la contracción). En poco más de una década, sin embargo, Einstein supo que el universo se expandía, y de un célebre plumazo eliminó la constante cosmológica de sus ecuaciones. Pero Einstein ya había dejado escapar el genio de la gravedad repulsiva de la lámpara de la relatividad general. Con el tiempo, la gravedad repulsiva sería de gran utilidad para la cosmología al permitir el empuje hacia fuera del Big Bang y ofrecer después una explicación de la expansión acelerada del universo. Como muchos otros han dicho, esto demuestra que hasta las malas ideas de Einstein eran buenas. <<

[15] Robert R. Caldwell, Marc Kamionkowski y Nevin N. Weinberg, «Phantom Energy and Cosmic Doomsday», *Physical Review Letters* 91 (2003), 071301. <<

[16] Abraham Loeb, «Cosmology with hypervelocity stars», *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 04 (2011), 023. <<

[17] La energía del interior de la Tierra es también un resto del calor producido cuando el tirón de la gravedad comprimió una nube de polvo y gas para formar el planeta primigenio. Aparte de esta fuente, también se genera calor a medida que la Tierra gira porque el movimiento produce fricciones en capas de rocas profundas que requieren una fuerza constante para sostener la velocidad de rotación. <<

[18] Fred C. Adams y Gregory Laughlin, «A dying universe: The long-term fate and evolution of astrophysical objects», *Reviews of Modern Physics* 69 (1997), págs 337-372; Fred C. Adams y Greg Laughlin, *The Five Ages of the Universe: Inside the Physics of Eternity*, Free Press, Nueva York, 1999, pp. 50-52. Consideraciones parecidas se pueden hacer sobre planetas o satélites que siempre han estado demasiado lejos de la estrella que orbitan como para que sus condiciones en la superficie sean acogedoras para el origen de la vida. Hay procesos internos dentro de esos cuerpos (su astrogeología) que podrían producir la energía suficiente para sustentar la vida bajo la superficie. La luna de Saturno Encélado es una buena candidata. A tan gran distancia del Sol, su gélida superficie no resulta hospitalaria para la vida, pero la atracción de Saturno y de sus otras lunas, que estiran Encélado un poco en una dirección y lo comprimen en otra, generan presiones y fricciones que calientan su interior hasta el punto de fundir el hielo y, posiblemente, sustentar algunas reservas de agua líquida. No es descabellado imaginar que algún día podamos perforar un pequeño agujero en la corteza helada de Encélado, bajar por él una sonda y vernos cara a cara con un enceladiano autóctono de aquellos océanos. <<

[19] Para una demostración, véase mi aparición en «The Late Show with Stephen Colbert», durante la cual se deja caer una pila de cinco pelotas, y la más ligera sale disparada a nueve metros de altura (sin duda el único récord Guinness que conseguiré). <https://www.youtube.com/watch?v=75szwX09pg8> <<

[20] Dyson ofrece una estimación aproximada de la tasa de eyección de planetas de sus sistemas solares, así como de la tasa de eyección de estrellas de sus galaxias: Freeman Dyson, «Time without end: Physics and biology in an open universe», *Reviews of Modern Physics* 51 (1979), p. 450. Adams y Laughlin proporcionan explicaciones y cálculos más detallados, además de trabajos originales de investigación acerca de algunos de estos procesos (por ejemplo, las implicaciones de que atraviesen nuestro sistema solar pequeñas estrellas vagabundas). F. C. Adams y G. Laughlin, «A dying universe: The long-term fate and evolution of astrophysical objects», *Reviews of Modern Physics* 69 (1997), pp. 343-347; Fred C. Adams y Greg Laughlin, *The Five Ages of the Universe: Inside the Physics of Eternity*, Free Press, Nueva York, 1999, pp. 50-51. <<

[21] Para una demostración en vídeo de la metáfora de la lámina de goma, hecha con licra, y una breve discusión sobre el comentario del siguiente párrafo acerca de las ondas gravitatorias y cómo decaen las órbitas planetarias, véase <https://www.youtube.com/watch?v=uRijc-AN-F0> **<<**

[22] R. A. Hulse y J. H. Taylor, «Discovery of a pulsar in a binary system», *Astrophysical Journal* 195 (1975), L51. <<

[23] La posibilidad de que una órbita que decae lentamente pueda indicar que se pierde energía a través de radiación gravitatoria fue planteada en R. V. Wagoner, «Test for the existence of gravitational radiation», *Astrophysical Journal* 196 (1975), L63. <<

[24] J. H. Taylor, L. A. Fowler y P. M. McCulloch, «Measurements of general relativistic effects in the binary pulsar PSR 1913+16», *Nature* 277 (1979), p. 437. <<

[25] Freeman Dyson, «Time without end: Physics and biology in an open universe», *Reviews of Modern Physics* 51 (1979), p. 451; Fred C. Adams y Gregory Laughlin, «A dying universe: The long-term fate and evolution of astrophysical objects», *Reviews of Modern Physics* 69 (1997), pp. 344-347. <<

[26] Fred C. Adams y Gregory Laughlin, «A dying universe: The long-term fate and evolution of astrophysical objects», *Reviews of Modern Physics* 69 (1997), pp. 347-349. <<

[27] Aislados, los neutrones tienen corta vida, de unos quince minutos. Sin embargo, como son más pesados que los protones, su proceso de desintegración implica la producción de un protón (más un electrón y un antineutrino). Para que un neutrón se desintegre dentro de un átomo, el núcleo tiene que hacer sitio para el protón producido, un requisito que no suele satisfacerse. Los protones que ya están en el núcleo ocupan los estados cuánticos disponibles, que de acuerdo con Pauli y su principio de exclusión no se pueden compartir, apuntalado de este modo la estabilidad del neutrón en este contexto. Si los protones se desintegran, al ser más ligeros que los neutrones no producen neutrones, así que no intervendría un proceso estabilizador parecido. <<

[28] Howard Georgi y Sheldon Glashow, «Unity of All Elementary-Particle Forces», *Physical Review Letters* 32, n.º 8 (1974), p. 438. <<

[29] Una tasa de desintegración del 50 % en 10^{30} años implica que en una muestra de 10^{30} protones hay una probabilidad del 50 % de que se desintegre uno de ellos en un año. <<

[30] Howard Georgi, comunicación personal, Universidad de Harvard, 28 de diciembre de 1997. <<

[31] Si los protones no se desintegrasen del modo que esperan las teorías como la gran unificación o la de cuerdas, que van más allá de las leyes establecidas para la física de partículas (es decir, del modelo estándar de la física de partículas), el futuro que he descrito requeriría de diversas modificaciones. Por ejemplo, solemos considerar los sólidos, como el hierro, objetos que preservan su forma, a diferencia de los líquidos, cuya forma es fluida. Pero a escalas de tiempo suficientemente prolongadas incluso el hierro se comportaría como un líquido, pues sus átomos atravesarían, por efecto túnel, todas las barreras normalmente erigidas por los procesos físicos y químicos. En el curso de 10^{65} años, un pedazo de hierro que flotase en el espacio reordenaría sus átomos, «fundiéndolos» en un grumo esférico, igual que el resto de la materia que todavía existiese. Aparte de las reconfiguraciones de forma, a escalas de tiempo aún más largas la identidad de la materia cambiaría: los átomos más ligeros que el hierro se irían fusionando, mientras que los más pesados que el hierro se fisionarían. El hierro posee la más estable de todas las configuraciones atómicas, y por consiguiente sería el producto final de todos esos procesos nucleares. La escala de tiempo para que concluyan todos esos procesos es de unos 10^{1500} años. A escalas de tiempo aún más largas, la materia acabaría, por un efecto de túnel cuántico, en el interior de agujeros negros, que a esta escala temporal se evaporarían de inmediato por la radiación de Hawking. Nótese, sin embargo, que incluso en el modelo estándar de la física de partículas (sin extensiones exóticas o hipotéticas), se cree que los protones acabarán desintegrándose, solo que a una escala mucho más larga que los 10^{38} años que hemos adoptado en el capítulo. Por ejemplo, hay un proceso cuántico exótico que cae plenamente dentro del marco del modelo estándar y que los físicos han estudiado teóricamente (conocido como instantón, utiliza la llamada solución esfalerón de las ecuaciones del campo electrodébil) que provocaría la desintegración de los protones. El proceso depende de un evento de túnel cuántico, de modo que la escala de tiempo para que esto ocurra es larga, según algunas estimaciones del orden de 10^{150} años hacia el futuro, pero mucho menos que los 10^{1500} años señalados más arriba. Los físicos han indagado asimismo sobre otros procesos extraños que también conducirían a la desintegración de los protones a escalas de tiempo diversas, pero en general en torno a 10^{200} años. Así pues, a esas alturas del futuro, es probable que toda materia compleja se

haya desmoronado. Véase Freeman Dyson, «Time without end: Physics and biology in an open universe», *Reviews of Modern Physics* 51 (1979), pp. 451-452, para las estimaciones sobre la fluidez de la materia sólida y la transformación de la materia en hierro. Los detalles técnicos sobre la posibilidad de que el túnel cuántico provoque la desintegración de los protones puede verse en G. ’t Hooft, «Computation of the quantum effects due to a four-dimensional pseudoparticle», *Physical Review D* 14 (1976), p. 3432, y F. R. Klinkhamer y N. S. Manton, «A saddle-point solution in the Weinberg-Salam theory», *Physical Review* D 30 (1984), p. 2212. <<

[32] Freeman Dyson, «Time without end: Physics and biology in an open universe», *Reviews of Modern Physics* 51 (1979), pp. 447-460. <<

[33] Dyson calcula la tasa necesaria de disipación de calor *D* para una Pensadora cuya «complejidad» sea *Q* (que es la tasa de producción de entropía por unidad de tiempo subjetivo de la Pensadora, o aproximadamente la producción de entropía por pensamiento de la Pensadora), y que opera a una temperatura *T*, y halla que $D \propto QT^2$. <<

[34] Para ser más precisos, en el lenguaje que estoy usando, Dyson supone que si tenemos un conjunto de Pensadoras, cada una de ellas ajustadas para funcionar a distintas temperaturas, la tasa de los procesos metabólicos de cada una de estas entidades, sea la que sea, será linealmente proporcional a la temperatura. En términos técnicos, Dyson propone lo que él llama «ley de escalado biológico», que dice lo siguiente: si se tiene una réplica de un entorno determinado, idéntico (en términos de mecánica cuántica) al original salvo porque la temperatura del nuevo entorno es T_{nueva} mientras que en el entorno original era $T_{original}$, y si hacemos una réplica de un sistema vivo tal que su hamiltoniano mecánico cuántico, salvo por transformación unitaria, venga dado por $H_{nueva} = (T_{nueva}/T_{original})\ H_{original}$, entonces la copia está viva y tiene experiencias subjetivas idénticas al original, salvo en que todas sus funciones internas se ven reducidas en un factor de $T_{nueva}/T_{original}$. <<

[35] Para el lector interesado en la matemática, nótese que si la temperatura, T, es función del tiempo, t, de acuerdo con $T(t) \sim t^{-p}$, la integral de la expresión de la nota 33, QT^2, convergerá para $p > \frac{1}{2}$, mientras que el número total de pensamientos (la integral de $T(t)$) divergirá para $p < 1$. Así pues, para $\frac{1}{2} < p < 1$, la Pensadora puede pensar un número infinito de pensamientos con un suministro finito de energía. **<<**

[36] Para el lector interesado en la matemática, la cuestión esencial es que la tasa máxima de eliminación de residuo (suponiendo que la Pensadora lo expela a través de radiación dipolar basada en electrones) es proporcional a T^3, mientras que la energía disipada es proporcional a T^2. Esto implica que existe un límite inferior de *T* para evitar que el calor residual se acumule más deprisa de lo que puede expulsarse. <<

[37] Los científicos de la computación responsables de estos influyentes resultados incluyen a Charles Bennett, Edward Fredkin, Rolf Landauer y Tommaso Toffoli, entre muchos otros. Para una exposición perspicaz y accesible, véase Charles H. Bennett y Rolf Landauer, «The Fundamental Physical Limits of Computation», *Scientific American* 253, n.º 1 (julio de 1985), pp. 48-56 [hay trad. cast: «Limitaciones físicas fundamentales de los procesos de cómputo», *Investigación y Ciencia*, septiembre de 1985]. <<

[38] De manera más precisa, es «virtualmente» imposible deshacer una computación. Como el acto de borrado es en sí mismo un proceso físico, en principio podría revertirse mediante el mismo proceso que usaríamos para revertir el de hacer añicos un vaso de cristal: invirtiendo el movimiento de cada una de las partículas. Pero, en cualquier sentido práctico, eso no es factible. <<

[39] Diversos autores han considerado el impacto de una constante cosmológica sobre el futuro de la vida y la mente. Mucho antes del descubrimiento observacional de la energía oscura, John Barrow y Frank Tipler analizaron la física de la computación en un universo con una constante cosmológica y argumentaron que el procesamiento de la información necesariamente llega a un fin, lo que supone también el fin de la vida y la mente (John D. Barrow y Frank J. Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press, Oxford, 1988, pp. 668-669). Lawrence Krauss y Glenn Starkan revisaron el análisis de Dyson para un universo con una constante cosmológica y llegaron a una conclusión parecida (Lawrence M. Krauss y Glenn D. Starkman, «Life, the Universe, and Nothing: Life and Death in an Ever-Expanding Universe», *Astrophysical Journal* 531 [2000], pp. 22-30). Krauss y Starknab también argumentaron a partir de principios generales que la naturaleza discreta de estados para un sistema cuántico de tamaño finito pondría en peligro el pensamiento infinito en «cualquier» espacio-tiempo en expansión, incluso en ausencia de una constante cosmológica. No obstante, Barrow y Hervik razonaron que, aprovechando gradientes de temperatura generados por ondas gravitatorias, el procesamiento de información puede de hecho continuar de manera indefinida en un universo que no tenga una constante cosmológica (John D. Barrow y Sigbjørn Hervik, «Indefinite information processing in ever-expanding universes», *Physics Letters B* 566, n.º 1-2 [24 de julio de 2003], pp. 1-7). Freese y Kinney llegaron a una conclusión parecida, argumentando que en un espacio-tiempo cuyo tamaño de horizonte aumenta con el tiempo (a diferencia de un universo con una constante cosmológica en el que el tamaño del horizonte es fijo), el espacio de fases continuamente adquiere nuevos modos (aquellos cuyas longitudes de onda caen por debajo de la del creciente horizonte de tamaño), que brindan al sistema un suministro continuo de nuevos grados de libertad que pueden transportar el residuo al entorno, permitiendo de este modo que la computación prosiga de manera indefinida hacia el futuro lejano (K. Freese y W. Kinney, «The ultimate fate of life in an accelerating universe», *Physics Letters* B 558, n.º 1-2 [10 de abril de 2003], pp. 1-8). <<

[40] K. Freese y W. Kinney, «The ultimate fate of life in an accelerating universe», *Physics Letters B* 558, n.º 1-2 [10 de abril de 2003], pp. 1-8. <<

[1] El hecho de que procesos con probabilidades minúsculas puedan aprovecharse de larguísimos períodos de tiempo para abrirse camino hacia la realidad es algo que ya hemos encontrado en capítulos anteriores. Al referirme a una de las explicaciones de qué podría haber desencadenado el Big Bang, comenté que el despliegue del cosmos podría haber esperado mucho tiempo hasta que se diera la improbable configuración de un campo de inflatón uniforme que ocupase una pequeña región, donde habría generado la gravedad repulsiva que habría puesto en marcha la expansión del espacio. En lo que constituye otro ejemplo general e importante, recalqué que la segunda ley de la termodinámica no es una ley en el sentido convencional, sino una tendencia estadística. Las reducciones de la entropía son extraordinariamente improbables, pero si se espera el tiempo suficiente, hasta lo más improbable sucede. <<

[2] Freeman Dyson en Jon Else (dir.), *The Day After Trinity*, KETH, Houston, 1981. <<

[3] Comunicación personal con John Wheeler, Princeton University, 27 de enero de 1998. <<

[4] W. Israel, «Event Horizons in Static Vacuum Space-Times», *Physical Review* 164 (1967), p. 1776; W. Israel, «Event Horizons in Static Electrovac Space-Times», *Communications in Mathematical Physics* 8 (1968), p. 245; B. Carter, «Axisymmetric Black Hole Has Only Two Degrees of Freedom», *Physical Review Letters* 26 (1971), p. 331. <<

[5] Jacob D. Bekenstein, «Black Holes and Entropy», *Physical Review D* 7 (15 de abril de 1973), p. 2333. Para un resumen matemático elegante y accesible del cálculo de Bekenstein, véase Leonard Susskind, *The Black Hole War: My Battle with Stephen Hawking to Make the World Safe for Quantum Mechanics*, Little, Brown and Co., Nueva York, 2008, pp. 151-154 [hay trad. cast.: *La guerra de los agujeros negros: una controversia científica sobre las leyes últimas de la naturaleza*, Crítica, Barcelona, 2009]. <<

[6] Para ser más precisos, el área aumenta en una unidad cuadrada si se escoge como unidad una cuarta parte del cuadrado de la longitud de Planck. <<

[7] Las propiedades magnéticas del electrón, que son altamente sensibles a las fluctuaciones cuánticas del espacio vacío, proporcionan la concordancia más impresionante entre observaciones y predicciones matemáticas. Los cálculos matemáticos son poco menos que heroicos. A finales de la década de 1940, Richard Feynman introdujo un esquema gráfico para organizar esos cálculos cuánticos con la ayuda de lo que hoy se conoce como «diagramas de Feynman». Cada diagrama representa una contribución matemática que requiere una meticulosa evaluación, y al concluir el cálculo, hay que sumar todos los términos. Para determinar las contribuciones cuánticas a las propiedades magnéticas de los electrones (el momento dipolar del electrón), los investigadores necesitaron evaluar más de doce mil diagramas de Feynman. La espectacular concordancia entre esos cálculos y las mediciones experimentales se cuenta entre los mayores triunfos que ha producido nuestro conocimiento de la física cuántica (véase Tatsumi Aoyama, Masashi Hayakawa, Toichiro Kinoshita y Makiko Nio, «Tenth-order electron anomalous magnetic moment: Contribution of diagrams without closed lepton loops», *Physical Review D* 91 [2015], 033006). <<

[8] Aunque use el carbón como analogía, conviene comentar una diferencia esencial entre la radiación emitida por la combustión que nos resulta más familiar y la radiación emitida por un agujero negro. Cuando el carbón resplandece, la radiación es emitida directamente por la combustión del material que constituye el carbón, de manera que la radiación lleva la huella de la composición material específica de este. En un agujero negro, sin embargo, toda la materia se ha comprimido en la singularidad, y cuanto más masivo sea el agujero negro, mayor será la separación entre la singularidad y su horizonte de sucesos, de modo que la radiación emitida por el horizonte de sucesos no llevará una huella de la composición material del agujero negro. Esta diferencia nos brinda una manera de comprender lo que se conoce como «paradoja de la información del agujero negro». Si la radiación emitida por un agujero negro es insensible a los ingredientes específicos a partir de los cuales se formó este, entonces cuando el agujero negro se haya transformado completamente en radiación, la información contenida en esos ingredientes se habrá perdido. Esta pérdida de información perturbaría la progresión mecánico-cuántica del universo, de modo que los físicos has pasado décadas intentando establecer que la información no se pierde. Hoy en día, la mayoría de los físicos concuerdan en que tenemos argumentos sólidos para apoyar la tesis de que la información realmente se conserva, pero todavía quedan muchos detalles por resolver en la vanguardia de la investigación. <<

[9] La fórmula de Hawking muestra que la radiación del cuerpo negro emitida por un agujero negro de Schwarzschild (un agujero negro sin rotación ni carga) de masa M viene dado por $T_{\mathrm{Hawking}} = hc^3/16\pi^2 GMk_{\mathrm{b}}$ (donde h es la constante de Planck, c la velocidad de la luz, G la constante de Newton, y k_{b} la constante de Boltzmann). S. W. Hawking, «Particle Creation by Black Holes», *Communications in Mathematical Physics* 43 (1975), pp. 199-220. <<

[10] Don N. Page, «Particle emission rates from a black hole: Massless particles from an uncharged, nonrotating hole», *Physical Review D* 13 n.º 2 (1976), pp. 198-206. Las cifras citadas actualizan el cálculo de Page a partir de evaluaciones más recientes de las propiedades de las partículas, en particular la masa distinta de cero de los neutrinos. <<

[11] De manera más precisa, una bola cuyo radio no sea mayor que el radio de Schwarzschild, cuya forma matemática en función de la masa, *M*, es $R_{\text{Schwarzschild}} = 2GM/c^2$. <<

[12] Nótese que me refiero a lo que podría llamarse «densidad media efectiva» de un agujero negro, es decir, su masa total dividida por el volumen total contenido en una esfera con el mismo radio que su horizonte de sucesos. La idea es intuitivamente útil, pero en el mejor de los casos es, como el lector experto reconocerá, solo heurística. Cuando se forma un agujero negro, la dirección radial dentro de su horizonte de sucesos se torna de tipo tiempo (*timelike*), de modo que la idea de volumen espacial interior del agujero negro se convierte en una idea más sutil (de hecho, se torna divergente). Además, la masa del agujero negro no llena de manera uniforme ese volumen, de modo que la densidad media que calculamos no tiene manifestación física dentro del propio agujero negro. No obstante, la densidad media de un agujero negro, tal como la hemos definido, nos permite apreciar intuitivamente por qué los agujeros negros más grandes producen entornos externos menos extremos y generan una radiación de Hawking de menor temperatura. <<

[13] En el capítulo anterior comentamos que la expansión acelerada del espacio da origen a una temperatura de fondo minúscula y constante de unos 10^{-30} K. La temperatura de un agujero negro de masa superior a unas 10^{23} veces la masa solar sería inferior a la temperatura ambiente del espacio en el futuro lejano. Sin embargo, ese agujero negro sería mayor que el propio horizonte cosmológico. <<

[14] El *wiffle ball* es un deporte parecido al béisbol que se juega con una pelota de plástico ligera y perforada, más lenta en el aire, lo que permite que el encuentro se desarrolle en lugares confinados. (*N. del t.*) <<

[15] De acuerdo con las matemáticas, cuando los fotones atraviesan el campo de Higgs no experimentan ningún tipo de resistencia por fricción, y por lo tanto no tienen masa y el campo de Higgs es invisible. <<

[16] Peter Higgs en «¿Qué es el espacio?», el primero de los cuatro episodios del documental de NOVA *El tejido del cosmos*, basado en el libro del mismo título. Otros físicos que desarrollaron ideas parecidas a las de Higgs más o menos al mismo tiempo incluyen a Robert Brout y François Englert, y a Gerald Guralnik, C. Richard Hagen y Tom Kibble. Higgs y Englert compartieron el premio Nobel por su trabajo. **<<**

[17] El número concreto tiene menos significación de lo que pudiera parecer. El valor de 246 (o, más precisamente, 246,22 GeV, donde GeV es la abreviatura de la unidad convencional de gigaelectronvoltios) depende de las convenciones matemáticas que suelen invocar los físicos. Pero otras convenciones que se alejan del estándar también dan como resultado una física equivalente con valores numéricos distintos. <<

[18] Sidney Coleman, «Fate of the False Vacuum», *Physical Review D* 15 (1977), p. 2929; Erratum, *Physical Review D* 16 (1977), p.1248. <<

[19] Más precisamente, la esfera se expandiría lentamente al principio y luego aumentaría rápidamente su velocidad hacia la de la luz. <<

[20] A. Andreassen, W. Frost y M. D. Schwartz, «Scale Invariant Instantons and the Complete Lifetime of the Standard Model», *Physical Review D* 97 (2018), 056006. <<

[21] La posibilidad de que nuestro universo haya surgido de un baño uniforme de alta entropía, con partículas que se agitan y chocan en el vacío, en el que una rara caída espontánea a una entropía inferior diese como resultado las estructuras que presenciamos fue planteada por Ludwig Boltzmann en dos artículos (Ludwig Boltzmann, «On Certain Questions of the Theory of Gases», *Nature* 51 [1895], pp. 413-415; Ludwig Boltzmann, «Entgegnung auf die wärmetheoretischen Betrachtungen des Hrn. E. Zermelo», *Annalen der Physik* 57 [1896], pp. 773-784). Más tarde, Arthur Eddington señaló que como las caídas de entropía de menor magnitud son más probables, es mucho más probable que una fluctuación de ese tipo no genere un universo entero lleno de estrellas, planetas y personas (lo que requeriría una caída drástica de entropía), sino que se limite a producir solamente «físicos matemáticos» (observadores implicados en los mismos experimentos mentales que estaba explorando) dentro de un universo por lo demás desorganizado (A. Eddington, «The End of the World: From the Standpoint of Mathematical Physics», *Nature* 127, n.º 1931 [3203], pp. 447-453). Mucho más tarde, la idea de «físicos matemáticos» se despojó aún más de contenido para quedarse en una caída entrópica aún más modesta que solo daría lugar a los componentes pensantes de los observadores, a los que se bautizó como «cerebros de Boltzmann» (por lo que yo sé, el primer uso explícito del término se encuentra en A. Albrecht y L. Sorbo, «Can the Universe Afford Inflation?», *Physical Review D* 70 [2004], 063528). <<

[22] Por razones que he recalcado en el capítulo, me centraré en la creación espontánea de estructuras que puedan pensar (cerebros de Boltzmann), pero la creación espontánea de nuevos universos enteros o la recreación espontánea de las condiciones que desencadenaron la expansión cosmológica inflacionaria también merecen nuestra atención. Para evitar cargar en exceso el capítulo, considero esas posibilidades en las notas 22 y 34. <<

[23] El lector más experto se habrá dado cuenta de que paso de puntillas por aspectos sutiles y controvertidos. No hay consenso universal acerca de cómo calcular las probabilidades de las diversas fluctuaciones cosmológicas espontáneas a las que hago referencia. Leonard Susskind y colaboradores defendieron una aproximación en L. Dyson, M. Kleban y L. Susskind, «Disturbing Implications of a Cosmological Constant», *Journal of High Energy Physics* 0210 (2002), 011, a partir de una idea anterior de Susskind conocida como «complementariedad de horizontes». Recordemos que como la expansión del universo es acelerada, estamos rodeados por un lejano horizonte cosmológico. Las ubicaciones situadas más lejos del horizonte cosmológico se alejan de nosotros más deprisa que la velocidad de la luz, de manera que no hay posibilidad de que estemos influidos por nada que se encuentre a esa distancia o más lejos. Susskind, motivado por ese aislamiento (y por sus investigaciones previas sobre agujeros negros, que tienen su propia variedad de horizonte), defiende que se tomen en consideración únicamente los procesos físicos que tienen lugar dentro de nuestra «parcela causal» (*causal patch*), que podemos concebir como la región del espacio que se encuentra dentro de nuestro horizonte cosmológico), lo que a efectos prácticos descarta toda la física del espacio potencialmente infinito que se encuentre más allá del horizonte. De manera más precisa, Susskind argumenta que la física externa a nuestra parcela causal es redundante con la física del interior de nuestra parcela causal (de modo parecido a como las descripciones de onda y partícula de la mecánica cuántica son dos formas complementarias de discutir la misma física, la física interior a la parcela y exterior a la parcela también serían formas complementarias de discutir la misma física). Bajo esta suposición, la realidad se considera una parcela finita de espacio con una constante cosmológica fija, Λ, que produce una temperatura $T \sim \sqrt{\Lambda}$ (un poco como el caso canónico del gas caliente en una caja, que se estudia en los cursos introductorios de mecánica estadística). Calcular las probabilidades relativas de dos macroestados distintos se reduce entonces a calcular cocientes del número de microestados asociados con cada uno. Es decir, la probabilidad de una configuración dada es proporcional a (el exponencial de) su entropía. Desde esta perspectiva, Susskind y colaboradores observan que un encuentro de partículas dentro de nuestra parcela que produzca las condiciones necesarias para un Big Bang inflacionario es extraordinariamente

menos probable (porque tiene baja entropía) que un encuentro de partículas que de manera directa produzca el mundo tal como lo conocemos, desde las estrellas hasta las personas (porque esa configuración tiene una entropía más alta). Una aproximación alternativa al cálculos de las probabilidades es la sugerida en A. Albrecht y L. Sorbo, «Can the Universe Afford Inflation?», *Physical Review D* 70 (2004), 063528, que se basa en que la inflación surja de un evento local de efecto túnel. Este enfoque produce probabilidades radicalmente distintas. Albrecht y Sorbo consideran fluctuaciones hacia una entropía inferior (una región que a continuación experimentará inflación) dentro de un entorno que posee alta entropía; esto garantiza que la configuración total todavía posea alta entropía, lo cual incrementa las probabilidades. Susskind y colaboradores consideran la entropía solamente dentro de la propia fluctuación, argumentando que como la región se inflará con posterioridad, todo lo que hay fuera de la región se encuentra fuera de su horizonte cosmológico y, por lo tanto, puede ignorarse. La menor entropía total que Susskind y colaboradores asignan a la fluctuación reduce rápidamente la probabilidad de que ocurra. **<<**

[24] En la nota 9 del capítulo 2 expliqué que la entropía de un sistema se define de forma más rigurosa como el logaritmo natural del número de estados cuánticos accesibles. Así pues, si un sistema tiene entropía *S*, el número de esos estados es *e* S. Si suponemos que un sistema pasa casi el mismo tiempo en cualquiera de los microestados compatibles con su macroestado, entonces la probabilidad *P* de una fluctuación desde un estado inicial de entropía *S* 1 a un estado final de entropía *S* 2 viene dado por el cociente entre el número de microestados asociados con cada uno, es decir, $P = eS_2/eS_1 = e\ (S_2 - S_1)$. Para mayor claridad, escribamos $S_2 = S_1 - D$, donde *D* es la «caída» de entropía desde el estado inicial S_1, y entonces $P = e^{(S_1 - D - S_1)} = e^{-D}$, donde vemos cómo la probabilidad disminuye exponencialmente en función de la caída de entropía. ¿Cuál es, entonces, la probabilidad de que se forme un cerebro de Boltzmann? Pues bien, a la temperatura *T*, las partículas de nuestro baño térmico poseen energías muy parecidas a *T* (usando unidades con $k_B = 1$), de modo que para construir un cerebro de masa *M* necesitamos apropiarnos de *M*/*T* de esas partículas (usando unidades con $c = 1$). Como la entropía del baño sigue el número de partículas, la caída *D* es esencialmente igual a *M*/*T*, y su probabilidad es entonces $e^{-M/T}$. Como ejemplo de especial relevancia, pongamos la mirada en un futuro muy lejano y tomemos para *T* un valor igual a la temperatura del baño térmico que surge del horizonte cosmológico, alrededor de 10^{-30} K, que es aproximadamente 10^{-41} GeV (donde GeV, el gigaelectronvoltio, es aproximadamente igual a la energía equivalente de la masa de un protón). Como un cerebro posee unos 10^{27} protones, *M* /*T* será aproximadamente $10^{27}/10^{-41} = 10^{68}$. Así pues, la probabilidad de que se forme espontáneamente un cerebro se sitúa alrededor de e^{-1068}. El tiempo necesario para que se dé una probabilidad razonable de que se produzca este suceso es proporcional a $1/(e^{-1068})$, es decir, e^{1068}, que en este capítulo, simplificando, aproximamos con 10^{1068}. <<

[25] Aunque el tiempo podría ser ilimitado, hay una escala de tiempo de relevancia, natural pero finita, que se conoce como «tiempo de recurrencia». Comento esta cuestión en la nota 34, de modo que aquí bastará con decir que el tiempo de recurrencia es tan largo que el número de cerebros de Boltzmann que surgirían antes de que se alcance ese límite es ingente pese a la minúscula tasa de formación. <<

[26] El lector especialmente aplicado se habrá percatado de que implícitamente invocamos el principio de indiferencia descrito en la nota 8 del capítulo 3. Es decir, cuando considero el origen de mi cerebro, asigno la misma probabilidad a cada encarnación que produzca la misma configuración física. Como casi todas ellas se habrán formado a la manera boltzmanniana, es altamente improbable que la historia que suelo contar sobre el origen de mi cerebro sea la verdadera. Ahora bien, como en la nota 8 del capítulo 3, se puede criticar el uso del principio de indiferencia en situaciones que no guardan parecido alguno con aquellas con las que se ha verificado empíricamente el principio (tiradas de monedas o dados, o la ingente variedad de situaciones aleatorias con las que nos encontramos en la vida diaria). No obstante, a muchos cosmólogos destacados este enfoque no les satisface y, por lo tanto, consideran que el enigma del cerebro de Boltzmann que describo en este capítulo no es un asunto baladí. <<

[27] Véase David Albert, *Time and Chance*, Harvard University Press, Cambridge, MA, 2000, p. 116; Brian Greene, *The Fabric of the Cosmos*, Vintage, Nueva York, 2005, p. 168 [hay trad. cast.: *El tejido del cosmos*, Crítica, Barcelona, 2006]. <<

[28] Permítaseme que cite otras dos aproximaciones relacionadas para resolver el problema. Una consiste en imaginar que con el tiempo las «constantes» de la naturaleza van cambiando paulatinamente, de modo que los procesos físicos necesarios para formar cerebros de Boltzmann quedan suprimidos. Véase, por ejemplo, Steven Carlip, «Transient Observers and Variable Constants, or Repelling the Invasion of the Boltzmann’s Brains», *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 06 (2007), 001. La otra, defendida por Sean Carroll y colaboradores, es que las fluctuaciones necesarias para formar cerebros de Boltzmann no se dan bajo un tratamiento mecánico cuántico meticuloso (K. K. Boddy, S. M. Carroll y J. Pollack, «De Sitter Space Without Dynamical Quantum Fluctuations», *Foundations of Physics* 46, n.º 6 [2016], p. 702). <<

[29] Véase, por ejemplo, A. Ceresole, G. Dall’Agata, A. Giryavets *et al.*, «Domain walls, near-BPS bubbles, and probabilities in the landscape», *Physical Review D* 74 (2006), 086010. El físico Don Page ha adoptado un enfoque distinto para formular el problema del cerebro de Boltzmann haciéndonos notar que en todo volumen finito de espacio sometido a expansión acelerada, como el nuestro, habrá (a lo largo de un tiempo ilimitado) un número ilimitado de cerebros creados espontáneamente. Para evitar que nuestros cerebros sean miembros atípicos de este volumen en expansión, Page sugiere que nuestra región no dispone de tiempo ilimitado, sino que se dirige a algún tipo de destrucción. Sus cálculos (Don N. Page, «Is our universe decaying at an astronomical rate?», *Physics Letters B* 669 [2008], pp. 197-200) indican que el tiempo de vida máximo de nuestro universo podría ser de apenas veinte mil millones de años. Otros físicos (véase, por ejemplo, R. Bousso y B. Freivogel, «A Paradox in the Global Description of the Multiverse», *Journal of High Energy Physics* 6 [2007], 018; A. Linde, «Sinks in the Landscape, Boltzmann Brains, and the Cosmological Constant Problem», *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 0701 [2007], 022; A. Vilenkin, «Predictions from Quantum Cosmology», *Physical Review Letters* 74 [1995], p. 846) han sugerido otras maneras de eludir el problema del cerebro de Boltzmann usando distintos formalismos matemáticos para calcular la probabilidad de que se formen. En suma, sigue habiendo mucho desacuerdo sobre cómo calcular la probabilidad de este tipo de procesos, lo que sin duda será una fructífera fuente de controversia que alentará nuevas indagaciones. <<

[30] Kimberly K. Boddy y Sean M. Carroll, «Can the Higgs Boson Save Us from the Menace of the Boltzmann Brains?», 2013, arXiv:1308.468. <<

[31] Al menos esa es la historia tal como la explican las ecuaciones de Einstein. Determinar si esa potente implosión sería realmente el final o si algún otro proceso extraño podría revertirlo en el último momento requerirá de un tratamiento cuántico completo de la gravedad. El consenso general actual es que el túnel cuántico hacia valores negativos produce un estado terminal, un verdadero fin del tiempo para ese cosmos. <<

[32] Paul J. Steinhardt y Neil Turok, «The cyclic model simplified», *New Astronomy Reviews* 49 (2005), pp. 43-57; Anna Ijjas y Paul Steinhardt, «A New Kind of Cyclic Universe» (2019), arXiv:1904.0822[gr-qc]. <<

[33] Alexander Friedmann, trad. de Brian Doyle, «On the Curvature of Space», *Zeitschrift für Physik* 10 (1922), pp. 377-386; Richard C. Tolman, «On the problem of the entropy of the universe as a whole», *Physical Review* 37 (1931), pp. 1639-1660; Richard C. Tolman, «On the theoretical requirements for a periodic behavior of the universe», *Physical Review* 38 (1931), pp. 1758-1771. <<

[34] Lo más probable, sin embargo, es que no se pueda dirimir el caso con claridad. La razón es que el paradigma inflacionario puede contemplar también la falta de ondas gravitacionales primordiales: los modelos que reducen la escala de inflación de la energía producirían ondas demasiado débiles como para que podamos observarlas. Algunos investigadores defienden con vehemencia que esos modelos no son naturales y que, por lo tanto, son menos convincentes que el modelo cíclico. Pero ese es un juicio cualitativo sobre el que distintos físicos mantendrán opiniones distintas. Los potenciales datos (o más bien su ausencia) a los que hago referencia sin duda encenderían un ardiente debate en la comunidad física entre los proponentes de estas dos teorías cosmológicas, pero no es probable que se abandonase el escenario inflacionario. <<

[35] Aunque en el capítulo se habría acercado demasiado a una digresión, vale la pena observar aquí que existe una versión de cosmología cíclica que puede surgir de escenarios cosmológicos más estándares. Aunque difieren sustancialmente de la hipótesis de cosmos cíclico que acabo de describir, esta cosmología implica episodios secuenciales, pero a unas escalas temporales muchísimo más largas y con un mecanismo de origen distinto por completo. La física esencial fue desarrollada a finales del siglo XIX por el matemático Henri Poincaré, y por ello hoy la conocemos como «teorema de recurrencia de Poincaré». Para hacerse una idea de lo que dice el teorema, imaginemos que barajamos un juego de cartas. Como hay un número finito de ordenaciones de las cartas (un número enorme, sin duda, pero decididamente finito), si seguimos barajándolas, tarde o temprano el orden de las cartas se repetirá. Poincaré comprendió que si tenemos, pongamos por caso, moléculas de vapor de agua rebotando de manera aleatoria dentro de un recipiente, también es seguro que acabará produciéndose una repetición del mismo estilo. Por ejemplo, imaginemos que coloco un grupo apretado de moléculas de vapor de agua en una esquina de un recipiente y permito que se dispersen. No tardarán en llenar el recipiente y durante un tiempo espectacularmente largo mantendrán una apariencia uniforme mientras siguen moviéndose al azar por el espacio disponible. Pero si esperamos el tiempo suficiente, las moléculas acabarán por migrar al azar hacia configuraciones más ordenadas, de menor entropía. Poincaré fue más lejos y argumentó que las moléculas, siempre con movimientos al azar, acabarán por reunirse en una configuración arbitrariamente cercana a la inicial: un grupo apretado de moléculas en una esquina del recipiente. El razonamiento, aunque técnico, es parecido a la manera como llegamos a la conclusión de que el orden de un juego de cartas barajado al azar debe repetirse. Una lista inacabable de posiciones y velocidades aleatorias de partículas también se repetirá de forma necesaria. Uno puede mostrarse escéptico ante este afirmación; al fin y al cabo, a diferencia del juego, el número de configuraciones distintas de las moléculas de vapor de agua en un recipiente es infinitamente más grande. Pero Poincaré se hizo cargo de esta complicación al no defender una recreación exacta de una configuración anterior, sino una recreación aproximada y arbitrariamente parecida. Cuanto más precisa sea la configuración deseada, más habrá que esperar para que ocurra, pero con la tolerancia que uno prefiera, las partículas

recrearán la configuración anterior dentro de esa especificación.Aunque el razonamiento de Poincaré es clásico, en la década de 1950 su teorema se llevó a la mecánica cuántica. Si iniciamos un sistema cerrado con unas probabilidades determinadas de que sus partículas se hallen en ciertas ubicaciones, y permitimos que el sistema evolucione durante un tiempo lo bastante largo, las probabilidades llegarán a estar arbitrariamente cerca de sus valores iniciales, un ciclo que también se repetirá de manera indefinida. Un aspecto esencial del argumento de Poincaré, en su versión clásica o cuántica, es el hecho de que el vapor se encuentre confinado en un recipiente. De lo contrario, las moléculas seguirían dispersándose y nunca regresarían. Como el universo no es un recipiente cerrado, uno podría pensar que este teorema carece de relevancia cosmológica. Sin embargo, tal como se comenta en la nota 22 de este capítulo, Leonard Susskind ha argumentado que un horizonte cosmológico actúa como las paredes de un recipiente: confina la parte del universo con la que interactuamos a un tamaño finito y, en consecuencia, el teorema de Poicaré se aplica. Así pues, del mismo modo que el vapor de un recipiente al cabo de un tiempo larguísimo y extraordinario vuelve a una configuración arbitrariamente parecida a la que uno quiera, también ocurrirá lo propio en el caso de las condiciones dentro de nuestro horizonte cosmológico: para una precisión dada, toda configuración de partículas y campos se dará una y otra vez. Es una versión literal del eterno retorno. Dado el tamaño de nuestro horizonte cosmológico, podemos calcular el tiempo necesario para las recurrencias, y el resultado es la escala de tiempo más larga que hemos encontrado hasta este momento: $10^{10\ 120}$ años. No se puede evitar pensar en esas recurrencias en términos terrestres. Cada uno de los cientos de miles de personas que han vivido y han muerto eran configuraciones de partículas. Si esas configuraciones hubieran de darse una vez más, en fin… ya se puede ver que esta línea de pensamiento nos conduce a lugares que la ciencia suele evitar a toda costa. Pero antes de que nos dejemos llevar demasiado lejos, pensemos en que, como hemos visto, las caídas espontáneas de entropía pueden amenazar la base misma del conocimiento racional. Una cosa es que una reconfiguración aleatoria de partículas y campos desencadene un nuevo despliegue cosmológico, un nuevo Big Bang, y acabe produciendo estrellas, planetas y personas. Pero si resulta que hay una probabilidad mayor de que espontáneamente se recreen condiciones como las del universo actual, sin necesidad de Big Bang ni despliegue del universo, nos encontraremos de nuevo en el mismo cenagal al que nos llevaron los cerebros de Boltzmann. Aunque nuestro universo se haya originado de la manera cosmológica que

hemos descrito en capítulos anteriores, mirando al futuro lejano habríamos de concluir que la gran mayoría de los observadores como nosotros (algunos de los cuales tendrían los mismo recuerdos que nosotros y afirmarían ser nosotros) no habrían surgido de esa secuencia cosmológica. Pero cada uno de ellos pensaría que sí. Como en el caso de los cerebros de Boltzmann, nos habremos metido en un atolladero epistemológico. Alguien podría sugerir que eso no socava «nuestra» percepción de la realidad: nosotros y todo lo que nos es familiar podríamos haber surgido de un auténtico despliegue del cosmos. Lo perturbador es que cualquiera en el futuro puede asirse a esa misma historia consoladora y, sin embargo, la mayoría estarían equivocados. Como la gran mayoría de los observadores de toda la línea de tiempo no habrían surgido de la evolución cosmológica estándar, necesitaríamos un argumento convincente de que no nos encontramos entre los equivocados. Ese es un argumento que los físicos han intentado formular, sin que ninguno hasta ahora haya alcanzado amplia aceptación. Parte del problema es que todavía no entendemos plenamente la fusión entre mecánica cuántica y la gravedad, de manera que nuestros esquemas de cálculo son tentativos. Frente a esta situación, algunos físicos, entre los que destaca Susskind, han sugerido que la constante cosmológica podría no ser realmente constante. Después de todo, si en el futuro lejano la constante cosmológica se disipase, la era de expansión acelerada llegaría a su fin y desaparecía el horizonte cosmológico. Con ello, Poincaré y sus recurrencias quedarían neutralizadas. El veredicto, sin embargo, aguarda observaciones que, si somos optimistas, podrían arrojar luz sobre este futuro posible. <<

[36] Como la expansión inflacionaria comienza con una región diminuta del espacio que se infla con rapidez bajo la fuerza de la gravedad repulsiva, uno podría pensar que el dominio resultante debería tener necesariamente un tamaño finito. Al fin y al cabo, por mucho que se estire algo que es finito, sigue siendo finito. Pero la realidad es más intrincada. En la formulación estándar de la inflación, la mezcla de espacio y tiempo da como resultado observadores «dentro» de una región del espacio que experimenta una inflación sobre una extensión que es «infinita». Explico esto de manera más minuciosa en el capítulo 2 de *La realidad oculta*, a la que refiero al lector interesado en una explicación más amplia. Cabe notar también que la cosmología inflacionaria puede producir un multiverso distinto pero relacionado: una característica común de muchos escenarios inflacionarios es que la expansión inflacionaria puede producir muchos (generalmente infinitos) universos en expansión, de tal manera que nuestro universo no sería más que uno más de una ingente colección. El conjunto de todos esos universos se denomina multiverso inflacionario y surge de lo que se conoce como inflación eterna. Hay aspectos de la descripción del multiverso que ofrezco en este capítulo que se aplican también al multiverso inflacionario. Para más detalles, véase el capítulo 3 de *La realidad oculta*. <<

[37] Para evitar interacciones en las fronteras, puede rodearse cada una de esas regiones de una zona de separación lo bastante grande como para garantizar que ninguna región tenga contacto con ninguna otra. <<

[38] Jaume Garriga y Alexander Vilenkin, «Many Worlds in One», *Physical Review D* 64, n.º 4 (2001), 043511. Véase también J. Garriga, V. F. Mukhanov, K. D. Olum y A. Vilenkin, «Eternal Inflation, Black Holes, and the Future of Civilizations», *International Journal of Theoretical Physics* 39, n.º 7 (2000), pp. 1887-1900, además de la obra de divulgación: Alex Vilenkin, *Many Worlds in One*, Hill and Wang, Nueva York, 2006 [hay trad. cast.: *Muchos mundos en uno: la búsqueda de otros universos*, Alba, Barcelona, 2009]. <<

[39] Lee Harvey Oswald disparó a John F. Kennedy en 1963, Claus von Stauffenberg protagonizó un atentado fracasado contra Hitler en 1944 y James Earl Ray asesinó a Martin Luther King Jr. en 1968. (*N. del t.*) <<

[1] El papel de la evolución como modelador de la ética se discute en E. O. Wilson, *Sociobiology: The New Synthesis*, Harvard University Press, Cambridge, MA, 1975 [hay trad. cast.: *Sociobiología*, Omega, Barcelona, 1980], que inauguró un nuevo paradigma para el análisis del comportamiento humano en general y de la moralidad humana en particular. Para una exposición detallada que propone estadios potenciales en la evolución de la moralidad humana, véanse P. Kitcher, «Biology and Ethics», en *The Oxford Handbook of Ethical Theory*, Oxford University Press, Oxford, 2006, pp. 163-185, y P. Kitcher, «Between Fragile Altruism and Morality: Evolution and the Emergence of Normative Guidance», *Evolutionary Ethics and Contemporary Biology* (2006), pp. 159-177. <<

[2] T. Nagel, *Mortal Questions*, Cambridge University Press, Cambridge, 1979, pp. 142-146. <<

[3] Véase, por ejemplo, J. Haidt, «The Emotional Dog and Its Rational Tail: A Social Intuitionist Approach to Moral Judgment», *Psychological Review* 108, n.º 4 (2001): 814-834, y Jonathan Haidt, *The Righteous Mind: Why Good People Are Divided by Politics and Religion*, Pantheon Books, Nueva York, 2012. <<

[4] Jorge Luis Borges, *The Immortal*, en *Labyrinths: Selected Stories and Other Writings*, New Directions Paperbook, Nueva York, 2017, p. 115 (original en castellano: «El inmortal», en *El Aleph*, Lumen, Barcelona, 2019). Los otros libros citados en este párrafo son: Jonathan Swift, *Gulliver's Travels*, W. W. Norton, Nueva York, 1997 (hay. trad. cast.: *Los viajes de Gulliver*, Anaya, Madrid, 1989); Karel Čapek, *The Makropulos Case*, en *Four Plays: R. U. R.; The Insect Play; The Makropulos Case; The White Plague*, Bloomsbury, Londres, 2014. <<

[5] Bernard Williams, *Problems of the Self*, Cambridge University Press, Cambridge 1973. <<

[6] Aaron Smuts, «Immortality and Significance», *Philosophy and Literature* 35, n.º 1 (2011), pp. 134-149. <<

[7] Samuel Scheffler, *Death and the Afterlife*, Oxford University Press, Nueva York, 2016, pp. 59-60. <<

[8] En palabras de Wolf: «Nuestra confianza en la continuidad de la raza humana desempeña un papel enorme, aunque sobre todo tácito, en el modo en que concebimos nuestras actividades y comprendemos su valor» (Susan Wolf, «The Significance of Doomsday», en Samuel Scheffler, *Death and the Afterlife*, Oxford University Press, Nueva York, 2016, p. 13). <<

[9] Harry Frankfurt, «How the Afterlife Matters», en Samuel Scheffler, *Death and the Afterlife*, Oxford University Press, Nueva York, 2016, p. 136. **<<**

[10] Quienes siguen la visión de la mecánica cuántica de «muchos mundos» seguramente mostrarían esta descripción bajo otra luz. Si todos los resultados posibles se producen en uno u otro mundo, este mundo estaba predestinado. Pero no deja de ser extraordinario que entre los resultados posibles haya colecciones con conciencia de sí mismas. <<